



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Electrónica y Telecomunicaciones

**Evaluación del rango de transmisión de LoRa
para redes de sensores inalámbricos en un
ambiente rural de gran extensión y baja densidad
de árboles.**

*Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones.*

Autor :

Carlos Arturo Alvarez Aguilar

C.I. 0104654173

Director :

Ing. Andrés Marcelo Vázquez Rodas, PhD

C.I. 0301496840

Co-Director :

Ing. Alcides Fabián Araujo Pacheco, M.Sc.

C.I. 0102358504

Cuenca - Ecuador

18/04/2019



Resumen

El concepto de Internet de las cosas (IoT), no es nuevo. Sin embargo, no se ha llevado a la práctica de una manera contundente debido a las limitaciones tecnológicas. En la actualidad, se desarrollan diferentes tipos de redes que cumplan con los requerimientos del IoT. Entre ellas, están las redes de largo alcance y bajo consumo de energía (LPWAN). Las redes LPWAN son redes inalámbricas de largo alcance que se caracterizan por un bajo consumo de energía. La red LoRaWAN sobresale entre las redes LPWAN y es una de las tecnologías que mejor se perfilan para el IoT. La modulación LoRa utiliza una técnica de espectro ensanchado de chirp que ofrece gran resistencia a la interferencia, un buen presupuesto de enlace de comunicación y alto rendimiento con un bajo consumo de energía. Este documento se enfoca en evaluar el desempeño de la tecnología LoRa en exteriores, esencialmente en un ambiente rural abierto. Este tipo de ambientes es propicio para aplicaciones como la agricultura inteligente. Se toma como área de estudio la granja Iruquis de la Universidad de Cuenca, ubicada en la provincia del Azuay, Ecuador. Mediante el uso del kit de evaluación LoRa 900 de Microchip, se realiza una campaña de mediciones. Con los datos recolectados en las mediciones se plantea determinar un modelo empírico de pérdidas de trayectoria basado en el indicador de nivel de señal recibida (RSSI). Los resultados muestran que en un ambiente despejado y con un gateway colocado a 10 m de altura, es posible tener cobertura en toda la granja. El punto más alejado se encuentra a 1000 m del gateway. Se observó que el RSSI se ve afectado no por la distancia sino por los obstáculos que se encuentran entre el nodo y el gateway. Es importante colocar el gateway a una altura adecuada y de ser necesario colocar un segundo gateway en zonas donde la vegetación u otros obstáculos afecten demasiado a la transmisión.

Palabras Clave: IoT. LoRaWAN. LoRa. RSSI. Modelo. Pérdidas. Propagación. Rural. Cobertura.



Abstract

The Internet of Things (IoT) concept, is not new. However, it has not been carried out in a convincing manner due to still technological limitations. Currently, different types of networks are been developed to meet the requirements of the IoT. Among them, there is the low-power wide-area network (LPWAN). LPWAN networks are long-range wireless networks that are characterized by a low power consumption. The LoRaWAN network stands out among the LPWAN networks and is one of the most suitable technologies for the IoT. The LoRa modulation uses a chirp spread spectrum technique that offers great resistance to interference, a good communication link budget, and high performance with low power consumption. This document focuses on evaluating the performance of LoRa technology outdoors, essentially in an open rural environment. This type of environment is suitable for applications such as smart agriculture. The Iquis farm, located in the province of Azuay, Ecuador, is taken as the study area. By using the LoRa 900 evaluation kit from Microchip, a measurement set is carried out. With the data collected in the measurements, we propose an empirical model of trajectory losses based on the received signal strength indicator (RSSI). The results show that in a clear environment and with a gateway placed at 10 m in height, it is possible to have coverage throughout the all farm. The farthest point is around 1000 m from the gateway. It was found that the RSSI is affected not only by the distance but by the obstacles that are between the node and the gateway. It is important to place the gateway at an appropriate height and, if necessary, place a second gateway in areas where the vegetation or other obstacles affect considerably the transmission too much.

Kwywords: IoT. LoRaWAN. LoRa. RSSI. Model. Path Loss. Propagation. Rural. Coverage.





Índice general

Resumen	III
Abstract	V
Índice general	VII
Índice de figuras	XI
Índice de tablas	XV
Dedicatoria	XX
Agradecimientos	XXI
Abreviaciones y acrónimos	XXII
1. Introducción	1
1.1. Identificación del Problema	1
1.2. Justificación	2
1.3. Alcance	3
1.4. Objetivos	3



1.4.1. Objetivo General	3
1.4.2. Objetivos específicos	4
2. Marco Teórico	5
2.1. Introducción	5
2.2. Indicador de Nivel de la Señal Recibida	6
2.3. Redes de Sensores Inalámbricos	6
2.3.1. Estándares para IoT	7
2.4. Redes de largo alcance y bajo consumo	8
2.5. Modulación LoRa	9
2.5.1. Principales parámetros de la Transmisión de Datos LoRa	11
2.5.2. Características de la modulación LoRa	11
2.6. LoRaWAN	12
2.6.1. Clases de Control de Acceso al Medio LoRaWAN	13
2.6.2. Seguridad de LoRaWAN	14
2.6.3. Activación de dispositivos finales	15
2.6.4. Tasa de datos y Potencia de Transmisión	16
2.7. Agricultura de Precisión	17
2.8. Modelo de pérdidas de trayectoria	18
2.9. Conclusiones	19
3. Estado del Arte	21
3.1. Introducción	21
3.2. Trabajos que describen el desempeño de redes LoRaWAN	22



3.3. Conclusiones	25
4. Metodología	27
4.1. Introducción	27
4.2. Descripción del equipo para el desarrollo del proyecto	27
4.2.1. Raspberry Pi v3 modelo B	28
4.2.2. Kit de Evaluación de Microchip LoRa 900	29
4.3. Arquitectura de red propuesta	32
4.4. Descripción del ambiente de investigación	33
4.5. Método de adquisición de datos	34
4.5.1. Coordenadas de los puntos de Transmisión	35
4.5.2. Descripción del ambiente correspondiente a los radios R2 a R6	37
4.5.3. Descripción del ambiente correspondiente a los radios R1 - R7 - R8 - R9	38
4.5.4. Descripción del ambiente correspondiente a los radios R10 a R13	39
4.5.5. Análisis de ambiente correspondientes a los radios R14 a R16	39
4.6. Parámetros de calibración de equipos	40
4.7. Descripción del procedimiento de transmisión y adquisición de datos.	41
4.8. Conclusiones	41
5. Resultados: análisis de datos y ajuste del modelo basado en el RSSI	43
5.1. Introducción	43
5.2. Predicción del RSSI	44
5.3. Proceso para obtener el modelo matemático	45
5.3.1. Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov.	47



5.3.2. Prueba de Kruskal Wallis	47
5.3.3. Test de Dunn	48
5.4. Ajuste logarítmico de los valores promedio de RSSI	50
5.5. Generación de modelos de pérdida de trayectoria	52
5.6. Comparación entre modelos de G1 - G2 - G3	55
5.7. Comparación de los modelos propuestos con el modelo de LoRaSim	56
5.8. Conclusiones	57
6. Conclusiones y Recomendaciones	58
6.1. Conclusiones	58
6.2. Recomendaciones	59
6.3. Trabajos Futuros	60
A. Reporte Técnico	63
B. Mediciones de RSSI y PER	97
B.1. RSSI promedio en cada radio vs la distancia	97
B.2. PER medido en cada radio vs la distancia	106
C. Mapas	114
C.1. Coordenadas geográficas de todos los puntos de transmisión	114
C.2. Mapa de calor del RSSI en toda la granja	116
C.3. Perfiles topográficos de cada radio	118
Bibliografía	120



Índice de figuras

2.1. Esquema de una WSN [1]	7
2.2. Comparación entre SF 8, 9 y 10 de LoRa [2]	10
2.3. Arquitectura de la red LoRaWAN [3]	13
2.4. Clases de uso LoRaWAN [3]	14
3.1. Valores RSSI de modulación LoRa [4]	23
3.2. Arquitectura del sistema [5]	24
3.3. RSSI medido a diferentes distancias y configuraciones (SF-BW-CR) [6].	25
4.1. Ordenador Raspberry Pi v3 model B [7]	28
4.2. Kit de Evaluación LoRa 900 [8]	29
4.3. Tarjeta Core Gateway de LoRa [8].	30
4.4. Tarjeta de Radio Gateway LoRa [8].	31
4.5. Dispositivo LoRa RN2903 [9]	32
4.6. Disposición física de los dispositivos.	33
4.7. Mapa del área de estudio.	34
4.8. Ubicación de dispositivos nodo y gateway [10].	35



4.9. Ubicación de los puntos de referencia.	36
4.10. Posición de puntos para ubicación del equipo transmisor.	37
4.11. Perfil topográfico del Radio 5	38
4.12. Perfil topográfico de R8.	39
4.13. Perfil de R13	39
4.14. Perfil de R15	40
5.1. Mapa de calor predicción RSSI.	45
5.2. Valores promedio de RSSI de R6.	46
5.3. Comparaciones de radios por parejas.	49
5.4. Valores de RSSI promedios de cada grupo.	51
5.5. Curva característica para modelo de pérdidas de trayectoria.	54
5.6. Comparación de modelos de pérdida de trayectoria de los tres grupos.	55
5.7. Modelos de pérdidas de trayectoria propuestos y el modelo de LoRaSim.	56
B.1. RSSI radio 1	97
B.2. RSSI radio 2	98
B.3. RSSI radio 3	98
B.4. RSSI radio 4	99
B.5. RSSI radio 5	99
B.6. RSSI radio 6	100
B.7. RSSI radio 7	100
B.8. RSSI radio 8	101
B.9. RSSI radio 9	101



B.10.RSSI radio 10	102
B.11.RSSI radio 11	102
B.12.RSSI radio 12	103
B.13.RSSI radio 13	103
B.14.RSSI radio 14	104
B.15.RSSI radio 15	104
B.16.RSSI radio 16	105
B.17.PER radio 1	106
B.18.PER radio 2	106
B.19.PER radio 3	107
B.20.PER radio 4	107
B.21.PER radio 5	108
B.22.PER radio 6	108
B.23.PER radio 7	109
B.24.PER radio 8	109
B.25.PER radio 9	110
B.26.PER radio 10	110
B.27.PER radio 11	111
B.28.PER radio 12	111
B.29.PER radio 13	112
B.30.PER radio 14	112
B.31.PER radio 15	113
B.32.PER radio 16	113





Índice de tablas

2.1. Estándares más comunes para IoT.	8
2.2. Parámetros de transmisión de datos de LoRa [11]	11
2.3. Características de LoRa consideradas en aplicaciones.	12
2.4. Clases de LoRaWAN.	14
2.5. Tasas de Datos de Transmisión US902-928 [12].	16
2.6. Potencia de transmisión US902-928 [12].	17
4.1. Características de Raspberry pi v3 model B.	28
4.2. Coordenadas geográficas de puntos de referencia.	36
4.3. Distribución de puntos en cada radio.	38
4.4. Parámetros de configuración del Kit LoRa	40
5.1. Valores obtenidos de la prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov.	47
5.2. Contrastes de hipótesis para prueba de Kruskal-Wallis.	48
5.3. Distribución de radios en Grupos	49
5.4. Coeficientes obtenidos a partir de las mediciones para el valor RSSI mediante ajuste logarítmico.	50
5.5. Valores utilizados para calcular las pérdidas de trayectoria.	52



5.6. Coeficientes obtenidos para los modelos de pérdidas de trayectoria.	52
--	----





Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Carlos Arturo Alvarez Aguilar, autor del trabajo de titulación "Evaluación del rango de transmisión de LoRa para redes de sensores inalámbricos en un ambiente rural de gran extensión y baja densidad de árboles", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 18 de abril de 2019

Carlos Arturo Alvarez Aguilar

C.I.: 0104654173



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Carlos Arturo Alvarez Aguilar, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Evaluación del rango de transmisión de LoRa para redes de sensores inalámbricos en un ambiente rural de gran extensión y baja densidad de árboles", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 18 de abril de 2019

Carlos Arturo Alvarez Aguilar

C.I: 0104654173



Dedicatoria

A mis padres Ruth y Marcelo, con gran amor les dedico todo mi esfuerzo y trabajo, por ser el pilar de mi vida. Porque siempre creyeron en mí, por sus palabras de aliento para que siguiera adelante y sea perseverante en el cumplimiento de mis metas. Este logro también es de ustedes. También se lo dedico a Jhoselin y Katherin por ser luz y alegría en mi vida.

Carlos Alvarez



Agradecimientos

En primer lugar, a Dios porque está conmigo a cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza espiritual para continuar, en segundo lugar, a mi familia, por brindarme su apoyo incondicional, y sobre todo por su amor. Mi más sincero agradecimiento a mis amigos que de una manera u otra me ayudaron a culminar este proyecto de tesis. Por último, mi gratitud a los docentes que han compartido sus conocimientos conmigo en esta etapa universitaria, en especial a los profesores Ing. Fabián Astudillo, Ing. Andrés Vázquez e Ing. Alcides Araujo. Gracias por su paciencia y enseñanzas.

Carlos Alvarez



Abreviaciones y Acrónimos

5GTN 5G Test Network. [22](#)

6LoWPAN IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks. [22](#)

ABP Activation by personalization. [14](#)

BER Bit Error Rate. [4](#)

BW Bandwidth. [3](#)

CRC cyclic redundancy check. [12](#)

CSS Chirp Spread Spectrum. [8](#)

FADR Fair Adaptive Data Rate. [22](#)

FCC Federal Communications Commission. [10](#)

IoT Internet of Things. [2](#), [6](#), [7](#), [11](#), [17](#), [21](#), [22](#), [67](#)

LoRa Long Range. [2](#), [5–9](#), [11](#), [12](#), [15–17](#), [19–21](#), [24–28](#), [35](#), [47](#), [66](#), [67](#), [71](#)

LoRaWAN Long Range Wide Area Network. [2–6](#), [11](#), [14](#), [17](#), [19–22](#), [24–26](#), [29](#), [66](#), [67](#)

LPWAN Low Power Wide Area Network. [2](#), [6](#), [7](#), [11](#), [22](#)

MAC Media Access Control Layer. [2](#), [6](#), [12–14](#), [19](#), [21](#), [26](#), [67](#)

OTAA Over the air activation. [14](#)

PER Packet Error Rate. [3](#), [24](#), [30](#), [38](#), [66](#), [67](#)

RSSI Received Signal Strength Indicator. [3–5](#), [16](#), [20](#), [24](#), [30](#), [35](#), [38](#), [42](#), [47–49](#), [54](#), [63](#), [64](#), [66](#), [71](#)

SF Spreading Factor. [3](#), [8](#), [20](#), [29](#), [30](#), [41](#), [42](#), [44](#), [45](#), [47](#), [63](#), [66](#)

SNR Signal to Noise Ratio. [3](#), [4](#), [24](#), [38](#), [66](#), [71](#)

TIC Tecnologías de la información y la comunicación. [6](#)

WSN Wireless Sensor Network. [2](#), [6](#), [17](#), [20](#)



Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se define el problema a tratar, la justificación, el alcance y los objetivos tanto general como específicos a cumplir durante el desarrollo de esta investigación.

1.1. Identificación del Problema

El Internet de las Cosas ([Internet of Things \(IoT\)](#)) se concibe como una red abierta de objetos inteligentes que tienen la capacidad de auto-organizarse, compartir información y recursos, y reaccionar frente a cambios en el entorno [13]. Aprovechando las capacidades de identificación, adquisición de datos, procesamiento y comunicación, [IoT](#) combina diferentes dispositivos para ofrecer servicios en varios campos [14]. [IoT](#) puede desplazarse a través de diferentes tipos de redes fijas o inalámbricas, entre las inalámbricas están las redes de largo alcance y bajo consumo ([Low Power Wide Area Network \(LPWAN\)](#)) [15].

Los nodos sensores por su tamaño y sencillez, están dotados de recursos muy limitados. Las investigaciones centran sus esfuerzos en optimizar el uso de los recursos que se disponen en un nodo. Por ejemplo, el uso de la energía [16], la comunicación de largo alcance [17] y la conectividad entre nodos sensores [18]. De estas investigaciones nacieron tecnologías que optimizan el consumo de energía y el alcance de transmisión. Entre dichas tecnologías se encuentra [Long Range \(LoRa\)](#) [19].

Dadas sus características, es idónea para aplicaciones que requieren cobertura en áreas abiertas, donde, por ejemplo la agricultura de precisión sobresale por su importancia. En la actualidad, se requiere potenciar los procesos de cultivo haciéndolos más eficientes. Por lo tanto se ha visto

la necesidad de fomentar propuestas que aplican tecnología a los procesos agrarios.

Resulta bastante complejo tender cables que crucen los campos, ya que se necesitarían recorrer largas distancias y estar expuestos a diferentes factores como la intemperie, la humedad o roedores. Para solventar estos inconvenientes, se ha volcado la mirada a las comunicaciones inalámbricas como [LoRa](#). Con esta herramienta, es posible brindar al agricultor información sobre el estado de plantas, suelo y ambiente permitiendo tomar las medidas necesarias a tiempo y de manera mesurada, lo cual no es factible con los procesos de cultivo tradicionales.

1.2. Justificación

[LoRa](#) es una tecnología de comunicaciones inalámbricas de largo alcance y bajo consumo de energía, con una velocidad de datos efectiva de 37.5 Kbps. Además presenta una alta sensibilidad -137 dBm (SX1272/73), -148 dBm (SX1276/77/78/79) [20]. La tecnología [LoRa](#) se caracteriza por una modulación propia y un protocolo dedicado. La modulación [LoRa](#) patentada por Semtech, se basa en la técnica de radio de espectro ensanchado [Chirp Spread Spectrum \(CSS\)](#) y presenta alta tolerancia a las interferencias, alta sensibilidad y bajo consumo de energía [21]. Por otro lado, se asocia con un protocolo diseñado para proveer de conexión a Internet en redes regionales, nacionales o globales, a dispositivos energizados por baterías. El protocolo más utilizado es [Long Range Wide Area Network \(LoRaWAN\)](#), desarrollado por LoRa Alliance. [LoRaWAN](#) Apunta a satisfacer requisitos claves del [IoT](#), como la comunicación bidireccional, la seguridad de extremo a extremo, la movilidad y los servicios de localización [22].

[LoRa](#) es adecuada para aplicaciones que requieren cobertura en extensas áreas abiertas. No obstante, este proyecto se enfoca en una aplicación para agricultura de precisión. Esta innovadora forma de hacer agricultura se abre paso mediante el diseño de redes de sensores conectados a través de [LPWAN](#). Estas redes son las que mejor se ajustan a la implementación de procesos automáticos en usos puntuales dentro de la agricultura, incluso permite imitar ciclos vitales de cultivos en ambientes artificiales o simulados de gran extensión.

Uno de los parámetros más relevantes al momento de diseñar una red inalámbrica, es la distancia de cobertura [23]. Este parámetro depende de diferentes factores, entre ellos se puede listar: potencia de transmisión, sensibilidad del receptor y frecuencia de operación. Otro factor externo determinante es el entorno donde se realiza la implementación, ya que, edificios, vegetación u otros obstáculos pueden incrementar considerablemente el desvanecimiento de una transmisión [24], [25]. [LoRa](#) es una tecnología relativamente nueva, por lo que la cantidad de estudios de evaluación de rango de transmisión en ambientes forestales es muy pobre.



1.3. Alcance

Se plantea desarrollar un modelo de pérdidas de trayectoria que facilite el desarrollo de redes de sensores con tecnología LoRa. Para lograr esto, se utilizará el Kit de Evaluación LoRa 900 de Microchip, el cual trabaja en la frecuencia de 915 MHz y consta de un transmisor y un *gateway* [26]. Este kit permite modificar varios parámetros como el factor de ensanchamiento (*Spreading Factor* (SF)), ancho de banda (*Bandwidth* (BW)) y potencia de transmisión, conforme lo establecido en LoRaWAN [27]. Variando estos parámetros, se pueden obtener diferentes alcances, permitiendo evaluar el rango de transmisión bajo distintas condiciones de operación.

Se realizará una campaña de mediciones en la granja Irquis, perteneciente a la Universidad de Cuenca. La granja se encuentra ubicada en el kilómetro 23 de la vía Cuenca– Girón, a la altura de la parroquia Victoria del Portete, a 2663 msnm [28]. El esquema de evaluación consta de un nodo LoRa que actúa como transmisor, y el *gateway* del kit como receptor. La tasa de paquetes perdidos (*Packet Error Rate* (PER)), actuará como parámetro de calidad general de la red. Las transmisiones serán receptadas por el *gateway*, que a su vez las transmitirá al servidor, el cual irá guardando un registro del indicador del nivel de señal recibida (*Received Signal Strength Indicator* (RSSI)) y PER de las transmisiones [29].

Una vez obtenidos estos datos, se propone ajustar una curva de pérdidas de trayectoria basada en el RSSI, que permita ajustar un modelo empírico de pérdidas de trayectoria para el área requerida [23], [24], [27]. Con los resultados obtenidos, se redactará un artículo académico y un reporte técnico que corroborará el trabajo realizado.

1.4. Objetivos

Al desarrollar el presente proyecto se establecen los siguientes objetivos:

1.4.1. Objetivo General

Determinar y ajustar una metodología de medición sobre un modelo de pérdidas de trayectoria basado en RSSI, realizando un modelo analítico, el cual permita facilitar la implementación de redes de sensores con tecnología LoRaWAN en un ambiente rural de gran extensión, caracterizado por tener baja densidad de árboles y vegetación de mediana y baja altura.

1.4.2. Objetivos específicos

- Realizar el análisis del estado del arte sobre la metodología para la toma de datos de manera radial, enfocada en un escenario rural con elevaciones poco pronunciadas, baja densidad de árboles y vegetación de mediana y baja altura.
- Configurar el kit de desarrollo de [LoRa](#) con [LoRaWAN](#), para el envío y captura de datos, tomando en cuenta la topografía del terreno, cubriendo totalmente el área de estudio.
- Hacer una campaña de mediciones en las que se tomarán muestras de [RSSI](#) y [PER](#) a distintas distancias y potencias, a fin de configurar parámetros de diseño que otorguen eficiencia y eficacia a los resultados requeridos por el proyecto.
- Ajustar un modelo de propagación adecuado para el uso de [LoRa](#) en un ambiente rural de gran extensión con una densidad de árboles baja, de tal manera que se obtenga la emisión, recepción y registro óptima de datos requeridos.
- Implementar en LoRaSim el modelo de propagación propuesto, estableciendo, distancia y posición de sensores emisores y del equipo receptor.

Capítulo 2

Marco Teórico

En el marco teórico se presentan aspectos generales de las redes de área amplia de baja potencia, para luego abordar de manera más detallada las características y funcionamiento de la red [LoRa](#) y del protocolo [LoRaWAN](#). También se muestra la manera en que se puede utilizar el parámetro [RSSI](#) para determinar un modelo de pérdidas de transmisión. Finalmente se describe la agricultura de precisión, que es una de las aplicaciones que se puede dar a las redes de área amplia basadas en [LoRa](#).

2.1. Introducción

Proyecciones muestran que para el año 2020, más de cincuenta billones de dispositivos electrónicos se comunicarán mediante conexiones inalámbricas [30]. Esto implica que la nueva generación de sistemas de comunicación llamada [Quinta Generación de Comunicaciones Móviles \(5G\)](#), se integre de manera simple a los servicios del [IoT](#), sin comprometer la calidad de los servicios tradicionales.

La tecnología [IoT](#) se utiliza en general para conectar dispositivos electrónicos de toda clase y servicio al Internet [31]. La principal diferencia entre el Internet convencional y el [IoT](#) es que los dispositivos tienen menos recursos disponibles, tales como memoria, potencia de procesamiento, ancho de banda y energía [32].

La forma de digitalizar y miniaturizar las cosas con pocos recursos, se ha encontrado con limitaciones tecnológicas en las redes inalámbricas actuales que no permiten cumplir con requerimientos energéticos, ni de escalabilidad obligatorios. Es por esta razón que han surgido nuevos

protocolos y tecnologías como las Redes de Amplia Cobertura y Baja Potencia [LPWAN](#). Estas tecnologías han desarrollado redes que brindan cobertura de mayor alcance mediante *gateways*, que adaptan parámetros, como tasa de transmisión, potencia, modulación entre otros, de tal manera que los dispositivos finales, llamados nodos sean eficientes en cuanto al consumo de energía [\[32\]](#).

2.2. Indicador de Nivel de la Señal Recibida

El [RSSI](#) describe la relación entre la potencia transmitida con la recibida de una señal inalámbrica y la distancia entre los nodos. Dentro de los diseños de redes inalámbricas, la medición del [RSSI](#) es uno de los parámetros más empleado debido a que necesita menor complejidad de implementación y consumo de energía. Este parámetro es relevante porque permite estimar la efectividad de la red [\[33\]](#).

Existen dos formas típicas de expresar el [RSSI](#), la primera de ellas es mostrarla como porcentaje, entendiendo de esta manera, que mientras mayor sea el valor del [RSSI](#), mejor es la señal recibida [\[34\]](#). Por otro lado, cuando se expresa el [RSSI](#) como valores dBm, se considera que mientras más cercano se encuentre a cero, su nivel de potencia de señal recibida es mejor.

2.3. Redes de Sensores Inalámbricos

Las redes de sensores ([Wireless Sensor Network \(WSN\)](#)) se basan en dispositivos de bajo coste y mínimo consumo (nodos), que son capaces de obtener información de su entorno y transmitirla a través de enlaces inalámbricos hasta un nodo central de coordinación llamado *gateway* el cual es el enlace hacia un servidor generalmente ubicado en una red externa [\[35\]](#).

Los nodos son capaces de formar una red en la que es posible la retransmisión de mensajes para llegar desde los nodos más lejanos hasta el *gateway*. Las [WSN](#) tienen un sistema de auto-restauración, es decir, si se avería un nodo o un enlace, la red encontrará nuevas vías para encaminar los paquetes de datos. Las capacidades de auto-diagnóstico, auto-configuración, auto-organización y reparación son características de este tipo de redes para resolver problemas que no son posibles en otras tecnologías [\[36\]](#).

La red de sensores usualmente se encuentra compuesta los elementos mostrados en la [Figura 2.1](#).

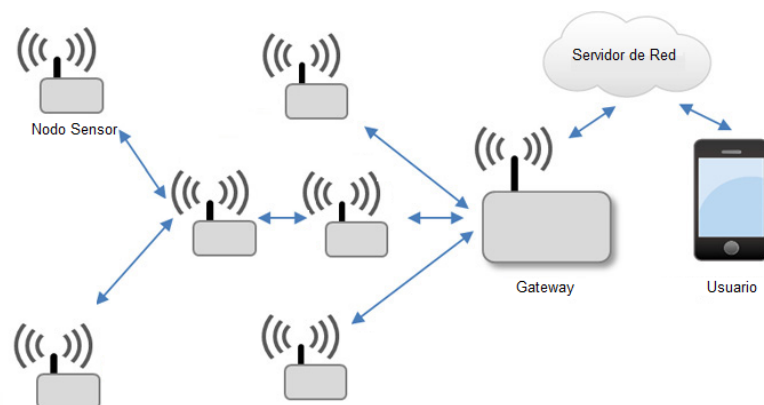


Figura 2.1: Esquema de una WSN [1]

2.3.1. Estándares para IoT

Cuando se habla de **IoT**, no se habla de una única tecnología. Existen distintas redes de comunicaciones y protocolos que intentan sobresalir con las prestaciones más adecuadas para dotar de conectividad a los dispositivos **IoT**.

Partiendo de que las tecnologías existentes en el momento en el que comenzó el auge del **IoT** no eran las óptimas para muchas de sus aplicaciones, el mercado ha debido ir adaptándose e innovando. Si bien es cierto que nos encontramos en pleno proceso de transición, es fundamental entender las distintas aproximaciones usadas cuando se va a crear una nueva solución **IoT** [2].

En la Tabla 2.1 se hace una revisión de algunas tecnologías de comunicación inalámbrica más comunes para **IoT**:

Estándar	Características
Bluetooth/LE	<ul style="list-style-type: none">• Está diseñado para transmitir pequeñas cantidades de datos que se envían con poca frecuencia.• Las aplicaciones más comunes es la transmisión de datos de sensores.• Una batería de tipo moneda puede durar un año o más.• Es compatible con teléfonos móviles y tabletas.• Permite una velocidad de transferencia de hasta 1Mbps.• Permite redes de malla con hasta 32.767 dispositivos [2].
IEEE 802.11ah	<ul style="list-style-type: none">• Es una versión de WiFi personalizada para IoT: <i>Low power, long range Wi-Fi</i>.• Permite tasas de datos desde los 100 Kbps hasta 78 Mbps.• Cobertura hasta 1 Km de distancia.• Funciona en las bandas del espectro ISM por debajo de 1 Ghz.• Hasta 1 km de alcance con un menor consumo de energía gracias a un modo de reposo [37].
IEEE 802.15.4	<ul style="list-style-type: none">• Comunicaciones de corto alcance destinado a proveer aplicaciones con requerimientos de latencia y rendimiento para redes inalámbricas de área personal (<i>Wireless Personal Area Network (WPAN)</i>) [38].• Soporte de bandas sin licencia, 2.4 GHz a nivel mundial [39].• Tasas de datos de hasta 250 kbps y alcances de hasta 100 m. Funciona con Zigbee, que es una tecnología que ofrece perfiles de comunicaciones y capa de red [40].
LPWAN	<ul style="list-style-type: none">• Es un tipo de red de área amplia de telecomunicaciones inalámbricas. Diseñada para comunicaciones de largo alcance a una baja tasa de datos y bajo consumo de energía.• Es la opción más atractiva como protocolo de transporte para las necesidades de IoT en áreas extensas.• Abarca tecnologías como Sigfox y LoRa que ofrecen una solución de bajo coste, tanto económico como energético.

Tabla 2.1: Estándares más comunes para IoT.

2.4. Redes de largo alcance y bajo consumo

Las redes de largo alcance y bajo consumo (LPWAN), son redes de telecomunicaciones inalámbricas diseñada para comunicaciones a largas distancias con baja tasa de datos con el fin de mantener un bajo consumo de energía y prolongar la vida de las baterías (varios años) de los dispositivos. La baja potencia y la baja tasa de datos distinguen este tipo de red de una típica WAN inalámbrica [41]. Las LPWAN logran esto al hacer que sus dispositivos IoT envíen solo pequeños paquetes de información periódicamente o incluso con poca frecuencia al despertar de

un activador externo o en un intervalo preprogramado. Las **LPWAN** son una tecnología básica para la implementación de **IoT**. A pesar de que las conexiones inalámbricas de corto alcance como Wi-Fi y Bluetooth seguirán siendo importantes (representarán el 72 % de los 27.000 millones de conexiones de **IoT** hacia 2025), se estima que un 11 % de las conexiones usarán tecnologías definidas por la 3GPP y **LPWAN** [42].

Mediante el uso de bandas ICM (Industrial, Científica y Médica), **LPWAN** ha podido llegar a distancias de entre 5 y 10 km en zonas urbanas e incluso de hasta 50 km en zonas rurales[43].

A continuación se listan las principales características de las redes **LPWAN**:

- Requerimiento de un mínimo consumo energético, dada la limitada capacidad de las baterías actuales y su elevado costo.
- El costo de los nodos es un factor preponderante, este factor se traduce en el costo de acceder a las herramientas para su instalación.
- El nivel de actividad depende de la aplicación específica; sin embargo, el dispositivo debe ser capaz de activarse únicamente al enviar información. Este aspecto afirmaría la idea de arquitecturas tipo estrella por sobre arquitecturas en malla.
- Pueden admitir un mayor número de dispositivos conectados en un área extensa.
- A pesar de que en la mayoría de aplicaciones los dispositivos permanecen estáticos, deben mantener robustez en la modulación.
- Hay una serie de estándares y proveedores que compiten en el espacio **LPWAN**, los más destacados son Sigfox y **LoRaWAN**.

2.5. Modulación LoRa

LoRa (*Long Range Modulation*), es una tecnología patentada de modulación de radio de espectro ensanchado (**CSS**) para redes **LPWAN**. La modulación **LoRa** pertenece a la capa física y es independiente de capas superiores, lo que le permite relacionarse con diferentes protocolos de capa **Media Access Control Layer (MAC)** [44]. **LoRa** ha sido diseñada con la premisa de mantener un bajo consumo de energía, cobertura a largas distancias y mejorar la sensibilidad del receptor. Es un protocolo apropiado para aplicaciones con requerimientos de baja tasa de datos para un ancho de banda determinado. **LoRa** usa varias bandas de frecuencia dependiendo de la región de operación. En América se utiliza la banda de 915 MHz, y en Europa 868 MHz.

LoRa utiliza la técnica chirp que consiste en modular el mensaje por medio de una señal que varía continuamente en frecuencia. **LoRa** varía de manera continua y lineal la frecuencia de su portadora. El recorrido de la frecuencia se da en una banda limitada y de manera lineal,

al llegar a la final la frecuencia salta al valor inicial. Así, LoRa logra el espectro ensanchado, generando una señal *chirp* que varía continuamente en frecuencia. En la Figura 2.2 se observa las diferentes frecuencias que recorre dentro de un ancho de banda disponible.

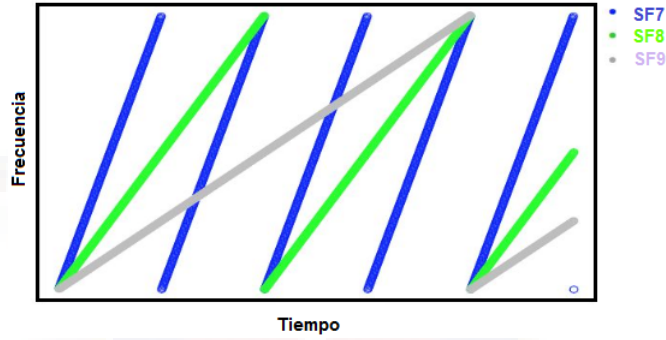


Figura 2.2: Comparación entre SF 8, 9 y 10 de LoRa [2]

LoRa implementa una tasa de datos ajustable mientras se mantienen un ancho de banda constante, esto lo logra utilizando un factor de ensanchamiento ortogonal SF. En la Figura 2.2 se aprecia dicha relación, a mayor SF mayor tiempo aire de los datos.

La relación matemática de la tasa de datos deseada y la tasa de símbolos para LoRa se expresa mediante la Ecuación 2.1 [45].

$$R_b = SF \times \frac{Tasa\ de\ Código}{\frac{2^{SF}}{BW}} \quad [bps] \quad (2.1)$$

La Ecuación 2.1, define la tasa de bits de la modulación LoRa, con el símbolo R_b , teniendo en cuenta que la tasa de código se resuelve por medio de la Ecuación 2.2.

$$Tasa\ de\ Código = \frac{4}{4 + CR} \quad (2.2)$$

Donde:

- SF = Factor de ensanchamiento, que puede variar entre 7 y 12
- CR = Tasa de codificación, que varía entre 1 y 4
- BW = Ancho de Banda [Hz]

2.5.1. Principales parámetros de la Transmisión de Datos LoRa

El dispositivo [LoRa](#) tiene la capacidad de ser configurado según la necesidad, variando un conjunto de parámetros que permiten diferentes combinaciones [3]. En la Tabla 2.2 se muestran estos factores principales:

Parámetro	Símbolo	Características
Potencia de Transmisión	TP	Considerando la implementación, estos valores pueden ajustarse desde 2 dBm a 20 dBm.
Frecuencia de Portadora	CF	Es la frecuencia central que varía en saltos de 61 Hz entre 137 MHz y 1020 MHz, dependiendo del chip y la región de uso.
Factor de En-sanchamiento	SF	Es la razón entre la tasa de símbolos y la tasa de <i>chips</i> . Un mayor SF incrementa el Signal to Noise Ratio (SNR) , el alcance, la sensibilidad, el tiempo aire del paquete y el consumo de energía; a su vez disminuye la tasa de datos. El SF puede variar entre 7 y 12.
Ancho de Banda	BW	Es el rango de frecuencias en la banda de transmisión. Un mayor BW, otorga una mayor tasa de datos pero menor sensibilidad por agregación de ruido. Una red LoRa típica opera en: 125 kHz, 250 kHz o 500 kHz.
Tasa de Codificación	CR	Se trata de la tasa de corrección de errores que envía (Forward Error Correction (FEC)) cuando se utiliza LoRa para evitar interferencias. Una tasa de código (Code Rate (CR)) mayor, ofrece más protección frente a ruido, pero incrementa el tiempo aire.

Tabla 2.2: Parámetros de transmisión de datos de LoRa [11]

2.5.2. Características de la modulación LoRa

Dentro de las redes [LPWAN](#), [LoRa](#) es la tecnología que mejor se perfila para aplicaciones [IoT](#), al presentar ventajas por su modulación y la configuración de parámetros adaptables a diferentes necesidades [44]. Algunas de sus características más importantes se resumen en la Tabla 2.3:

Parámetro	Aplicación
BW Escalable	LoRa es capaz de ajustar su ancho de banda y su frecuencia de operación lo que le permite operar en diferentes modos.
Bajo Consumo Energético	La batería puede durar por años ya que los dispositivos duermen por intervalos, además de la baja tasa de datos y mensajes poco frecuentes. La modulación CSS usa baja potencia en beneficio del aumento del rango de comunicación [45].
Alta Robustez	El CSS se ha utilizado en las comunicaciones de largo alcance debido a su capacidad para soportar interferencias.
Resistente a Desvanecimiento	Debido a la banda ancha de los pulsos <i>chirp</i> , LoRa ofrece en gran medida inmunidad al desvanecimiento.
Resistente a Doppler	La modulación CSS hace una variación lineal de la frecuencia en el tiempo, que permite la reducción tanto de la interferencia como de los efectos Doppler; sin embargo, la especificación de modulación LoRa no contiene criterios claros de su aplicabilidad en condiciones reales de un movimiento rápido del receptor relativo al transmisor[46].
Capacidad de Red Mejorada	La modulación LoRa emplea SF ortogonales que permiten transmitir múltiples señales de propagación simultáneamente y bajo el mismo canal sin una degradación considerable. Las señales moduladas con diferentes SF aparecen como ruido al receptor objetivo [47].
Amplia Cobertura	La baja velocidad de datos y la modulación LoRa llevan a una sensibilidad del receptor muy baja (hasta -148 dBm), esto combinado con una alta potencia de salida da como resultado presupuestos de enlace extremadamente grandes que permiten cubrir grandes distancias.

Tabla 2.3: Características de LoRa consideradas en aplicaciones.

2.6. LoRaWAN

LoRa atiende parámetros de modulación a nivel físico mientras que **LoRaWAN** es un protocolo que atiende parámetros como la comunicación bidireccional, seguridad de extremo a extremo (nodo-servidor), y de servidor a la aplicación específica [22].

LoRaWAN fue desarrollado por LoRa Alliance como protocolo, se encarga de la optimización de parámetros de **LoRa** para un menor consumo de energía en dispositivos finales (nodos). Tiene influencia directa sobre varios parámetros de rendimiento, que incluyen: la vida útil de la batería de un nodo y la capacidad y seguridad de la red.

El protocolo **LoRaWAN** construye redes centralizadas que utilizan típicamente una topología

que depende de sus elementos *gateways* y nodos. Se puede diseñar topologías en estrella, en la cual los *gateways* pasan los paquetes entre los dispositivos finales y un servidor de red central. Los *gateways* se enlazan al servidor de red vía IP mientras que los terminales de llegada utilizan transmisiones de radio con LoRa [48]. Una aproximación de la arquitectura de una red LoRaWAN, se observa en la Figura 2.3.

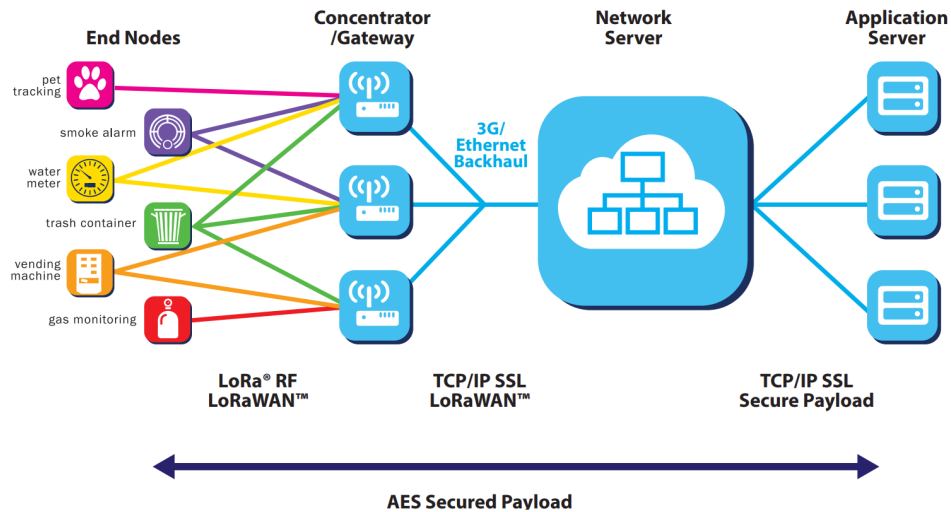


Figura 2.3: Arquitectura de la red LoRaWAN [3]

La comunicación entre los dispositivos finales y las puertas de enlace se distribuye en diferentes canales de frecuencia y velocidades de datos. La selección de la velocidad de datos es una compensación entre el rango de comunicación y la duración del mensaje. Debido a la tecnología de espectro expandido, las comunicaciones con diferentes velocidades de datos no interfieren entre sí y crean un conjunto de canales virtuales que aumentan la capacidad de la puerta de enlace.

Para maximizar la duración de la batería de los dispositivos finales y la capacidad general de la red, LoRaWAN administra la velocidad de datos y la salida de radio frecuencia para cada dispositivo final individualmente por medio de un esquema de velocidad de datos adaptable.

2.6.1. Clases de Control de Acceso al Medio LoRaWAN

LoRaWAN divide los dispositivos según las funcionalidades que soporten en las clases A, B y C. Todo dispositivo debe cumplir al menos con las funcionalidades de la clase A. Las 3 clases pueden coexistir en la misma red [49]. En la Tabla 2.4 se listan las características más importantes de las clases disponibles.

Clase	Características
A	<ul style="list-style-type: none"> El nodo final planifica la transmisión. Luego de cada transmisión Uplink existen dos ventanas Downlink. Esta clase tiene menor consumo de energía que la B y C. Adecuada para aplicaciones que solo necesitan enviar datos.
B	<ul style="list-style-type: none"> Crea ventanas de recepción sin necesidad una transmisión previa. Esto se logra enviado <i>beacons</i> desde el <i>gateway</i> para fijar el tiempo en el que el dispositivo final debe estar en modo de escucha. Tiene un mayor consumo de energía que la clase A.
C	<ul style="list-style-type: none"> Dispositivo en modo de recepción permanente que solo se interrumpe cuando hay una transmisión. Presenta la mejor latencia a cambio de un mayor consumo energético que la clase A y B.

Tabla 2.4: Clases de LoRaWAN.

En la Figura 2.4, se observa la disposición de las capas y clases LoRaWAN.

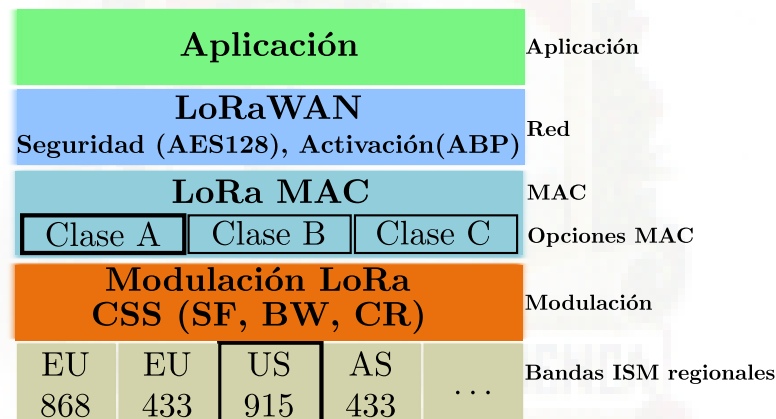


Figura 2.4: Clases de uso LoRaWAN [3]

2.6.2. Seguridad de LoRaWAN

El proceso de activación de un nodo se lleva a cabo a través de un mecanismo de autenticación mutua entre el nodo y el servidor de red. Esto se realiza mediante el siguiente procedimiento:

- El nodo y el servidor comparten una llave AppKey.
- El nodo utiliza la AppKey para calcular el código de integridad de mensaje (MIC, Message Integrity Check), para hacer una petición de conexión a la red.

- El servidor comprueba la autenticidad del mensaje verificando la AppKey.
- El servidor responde con un mensaje de aceptación cifrado con la misma AppKey, de esta forma el nodo puede comprobar la autenticidad del mensaje.

Todo el tráfico entre un nodo y un servidor de red se cifra y se firma con la combinación de dos llaves: la llave de sesión de aplicación AppSkey y la llave de sesión de red NwkSkey. Ambas llaves se derivan de la llave compartida AppKey y sólo son conocidas por un nodo concreto y el servidor de red.

LoRaWAN usa este mecanismo de cifrado simétrico de llave compartida donde ambos lados del proceso conocen dicha llave. La desventaja es que hay que distribuir la llave compartida de manera confidencial, dicha confidencialidad puede ser vulnerada. LoRaWAN resuelve esta problemática mediante la creación de las llaves de cifrado (AppSkey y NwkSkey) como derivación de una llave inicial junto a un valor aleatorio (que se crea durante el proceso de activación por lo que sólo es conocido por el nodo y el servidor de red). Esto hace que el proceso de creación de las llaves no sea reproducible ni siquiera sabiendo el valor de la llave inicial. El algoritmo de cifrado utilizado es AES-128bits [49].

2.6.3. Activación de dispositivos finales

Sólo los dispositivos autorizados deben poder unirse a una red. LoRaWAN establece un mecanismo denominado registro y activación mediante el cual se autoriza a un nodo a unirse a una red. El proceso de registro y activación finaliza con el almacenamiento en el nodo de los siguientes parámetros: dirección del dispositivo (DevAddr), identificador de aplicación (AppEUI), llave criptográfica de sesión (NwkSKey) y llave criptográfica de sesión de aplicación (AppSKey).

Hay dos formas de realizar el proceso de registro y activación de los nodos [50]:

- **Activación en el aire (Over-The-Air-Activation)**

El nodo necesita ciertos parámetros para el procedimiento de conexión:

- Identificador global único (DevEUI) que identifica de forma única al dispositivo
- Identificador de aplicación (AppEUI)
- Llave criptográfica AES-128 (AppKey) específica para cada dispositivo, ya que de esta llave se derivará AppSkey y la NwkSkey

Procedimiento de activación:

- El nodo envía un mensaje MAC de petición de unión que contiene los parámetros AppEUI y DevEUI.

- El servidor de red responde con un mensaje MAC de aceptación de unión, si el dispositivo final tiene permitido el unirse a la red.
 - El mensaje respuesta contiene: un valor aleatorio (AppNonce) del que, junto con AppKey, se derivan las dos llaves de sesión, la dirección del dispositivo (DevAddr) y el identificador de la red (NetID).
 - Una vez recibido el mensaje de aceptación, el dispositivo final genera las llaves de sesión (AppSKey y NwkSKey).
 - A partir de ese momento ya puede realizar transmisiones.
- **Activación por personalización (Activation By Personalization)** Con las siguientes características:
- Este procedimiento añade el dispositivo directamente a la red sin la necesidad de los mensajes de solicitud y aceptación de la red.
 - Esta forma de activación requiere que se almacene de manera manual las claves la DevAddr y dos claves de sesión NwkSKey y AppSKey antes de activar el nodo.
 - En cada dispositivo se tiene, NwkSKey y AppSKey únicas con el propósito de no comprometer la seguridad de la comunicación de otros dispositivos.

2.6.4. Tasa de datos y Potencia de Transmisión

El protocolo [LoRaWAN](#) cumple con las regulaciones establecidas por la Comisión Federal de Comunicaciones ([Federal Communications Commission \(FCC\)](#)) que impone un tiempo máximo de transmisión de 400 ms en enlace ascendente (*Uplink*) en la banda US 902-928 MHz. En la Tabla 2.5 se presentan las tasas de datos disponibles que corresponden a cada configuración.

Tasa de Datos	Configuración	Tasa de Bits	Capa Física [bps]
0	LoRa:SF10/125kHz		980
1	LoRa:SF9/125kHz		1760
2	LoRa:SF8/125kHz		3125
3	LoRa:SF7/125kHz		5470
4	LoRa:SF8/500kHz		12500
5:7	RFU		
8	LoRa:SF12/500kHz		980
9	LoRa:SF11/500kHz		1760
10	LoRa:SF10/500kHz		3900
11	LoRa:SF9/500kHz		7000
12	LoRa:SF8/500kHz		12500
13	LoRa:SF7/500kHz		21900
14:15	RFU		

Tabla 2.5: Tasas de Datos de Transmisión US902-928 [12].

Por otra parte, en la Tabla 2.6 se muestran los índices de potencia configurables de LoRaWAN junto al nivel de potencia correspondiente.

Configuración (TXPower)	Potencia [dBm]
0	30
1	28
2	26
3:13	—
14	2

Tabla 2.6: Potencia de transmisión US902-928 [12].

2.7. Agricultura de Precisión

La agricultura tradicional considera a los campos agrícolas como homogéneos y la aplicación de insumos no incluye la variabilidad espacial y temporal de la producción ni el análisis de las causas de dicha variabilidad. De modo que la agricultura de precisión es la aplicación de tecnologías y principios para el manejo de la variabilidad espacial y temporal a la producción agrícola con el fin de mejorar la productividad del cultivo y la calidad ambiental [51].

Las ventajas de la agricultura de precisión sobre la tradicional son claras, debido a la posibilidad de utilizar la dosis adecuada de diferentes insumos de acuerdo a la necesidad real del cultivo. Además presenta una ventaja sobre la sostenibilidad económica y ambiental, ya que se evita la aplicación de insumos en general y de agroquímicos en las áreas en que no son necesarios o que requieren cantidades inferiores [52].

La agricultura, como proceso de producción de alimentos a mediana y gran escala, se encuentra en plena renovación, demandando continuamente nuevos sistemas que provean al agricultor facilidad y beneficios en su trabajo.

Dada la versatilidad las tecnologías fundamentadas en IoT, estas están incursionando en el área de la agricultura. La posibilidad de conocer en un tiempo prudente y en cualquier lugar el estado de su cultivo, invita al agricultor a migrar hacia la denominada agricultura de precisión.

Los sistemas de cultivo con redes IoT se basan en el monitoreo del campo de cultivo con la ayuda de sensores (luz, humedad, temperatura, pH del suelo, etc.) y la automatización de sistemas involucrados, por ejemplo el sistema de riego [53].

Las redes de sensores inalámbricos pueden ampliar sus funcionalidades en conjunto con sistemas de actuadores para el monitoreo e intervención sobre cultivos. Tecnologías de comunicación como ZigBee, Bluetooth o LoRaWAN, por nombrar algunos, proporcionan herramientas versátiles

para la implementación de redes [IoT](#). [LoRaWAN](#) destaca para aplicaciones en agricultura dada su simple implementación y la relación entre el alcance y el consumo de energía.

2.8. Modelo de pérdidas de trayectoria

Los modelos de pérdidas de trayectoria logarítmicos o exponenciales, son los más usados para definir modelos empíricos para aplicaciones que usan este tipo de tecnología y se basan en indicador [RSSI](#). En [\[54\]](#) y [\[55\]](#) se define un modelo que toma en cuenta el [RSSI](#). La Ecuación [2.3](#) describe este modelo.

$$P_L(dB) = a + b \times \log(d) + X \quad (2.3)$$

Donde:

- P_L = Pérdidas de trayectoria en dB.
- a, b = Valores experimentales ajustados mediante los datos obtenidos en las campañas de medición.
- X = Representa la característica estocástica de la señal debido al ruido y a desvanecimiento multitrayectoria.
- d = Distancia de transmisión.

El factor exponencial de distancia es expresado por b ; mientras que a representa la potencia transmitida y la ganancia del sistema [\[54\]](#).

La aleatoriedad de la señal recibida es calculada con los datos medidos. Se asume X como una variable estocástica con distribución normal y media cero.

El nivel de potencia [RSSI](#) puede expresarse mediante la Ecuación [2.4](#) [\[56\]](#).

$$R_P = T_P + G_t + G_r - P_L \quad (2.4)$$

Donde:

- R_P = Potencia recibida por el transmisor en dBm.
- T_P = Potencia transmitida en dBm.
- G_t = Ganancia de la antena del transmisor en dBi.



- G_r = Ganancia de la antena del receptor en dBi.

2.9. Conclusiones

El propósito de las redes **LPWAN** no es proporcionar altas velocidades a las aplicaciones más exigentes. Por el contrario, el objetivo es proporcionar baja potencia para dispositivos pequeños como sensores y nodos inteligentes ubicados a largas distancias. Por lo general, estos dispositivos toman lecturas y envían la información a otro sistema que puede procesar los resultados y actuar en respuesta.

El **IoT** implica tener millones de elementos conectados y generando datos que deben ser almacenados. En consecuencia, otra arista importante del **IoT** son los sistemas de almacenamiento que soporten dicha cantidad de información.

LoRaWAN permite modificar parámetros como factor de ensanchamiento, ancho de banda, potencia de transmisión y tasa de codificación, brindando al usuario flexibilidad para adaptar el dispositivo a sus necesidades específicas.

LoRa se basa en la modulación **CSS** que permite brindar cobertura en áreas de gran extensión con un bajo consumo de energía, en función esto depende de las configuraciones del dispositivo. Para la configuración del dispositivo se debe considerar un compromiso entre el consumo de energía y la confiabilidad del enlace inalámbrico de la comunicación.

LoRa tiene un abanico de aplicaciones, las cuales expanden hacia ámbitos como la seguridad, Ciudades Inteligentes, agricultura de precisión entre otros. Su resistencia a fenómenos físicos y electromagnéticos proporcionan a **LoRa** la capacidad de adaptarse a aplicaciones con nodos estáticos y/o móviles.

Los dispositivos **LoRaWAN** pueden ser de 3 clases (A, B y C). Esto permite determinar un dispositivo en función de la necesidad: la clase A cuando no se necesita enviar datos desde el *gateway* al nodo. Clase B cuando se tienen una demanda media de envío de datos al nodo. La clase C cuando se tiene una gran demanda de envío de datos al nodo. Esto representa un balance entre consumo energético y capacidad de recepción.

El algoritmo de cifrado utilizado por **LoRaWAN** es AES-128bits. En consecuencia, se puede afirmar que **LoRa** presenta un buen esquema de seguridad.

El valor del **RSSI** es un parámetro que la mayoría de tecnologías de comunicación inalámbrica incluyen en sus paquetes. El **RSSI** al ser un indicador del nivel de potencia recibido, permi-



te definir modelos de pérdidas de propagación que ayudan a caracterizar la cobertura de un dispositivo para un ambiente específico.



Capítulo 3

Estado del Arte

En este capítulo se presenta un resumen de trabajos importantes, referentes a la experiencia en proyectos con la modelación [LoRa](#) y el protocolo [LoRaWAN](#).

3.1. Introducción

La modulación de capa física [LoRa](#) puede trabajar con el protocolo [LoRaWAN](#); sin embargo, ésta es solo una configuración de muchas que pueden existir, ya que [LoRa](#) puede trabajar con otros protocolos de capa [MAC](#). De igual manera [LoRaWAN](#) puede trabajar con otra modulación de capa física como la modulación por desplazamiento de frecuencia ([Frequency Shift Keying \(FSK\)](#)) [19].

En la actualidad, la documentación sobre [LoRa](#) y [LoRaWAN](#) en su mayoría se refiere a pruebas que determinan su desempeño en diferentes aplicaciones, ambientes y combinaciones de tecnologías. Esto se debe a que es una tecnología que recién está emergiendo junto al desarrollo del [IoT](#).

A continuación se presentan varios trabajos que exponen diferentes aplicaciones que se ha dado a [LoRa](#) así como las configuraciones hechas y los resultados obtenidos.

3.2. Trabajos que describen el desempeño de redes LoRa-WAN

En [57], se estudia la cobertura de LoRaWAN. Los experimentos se realizaron en la ciudad de Oulu, Finlandia. Oulu está a las orillas del mar, es principalmente plana y tiene edificios residenciales de hasta 12 pisos de altura. Las mediciones se llevaron a cabo en tierra (un auto a velocidad entre 40 y 100 km/h) y en el agua (un barco a igual velocidad del auto). Las configuraciones que se hicieron son 14 dBm de potencia de transmisión y el máximo SF. En tierra firme, para distancias entre 0 y 2 km existe una pérdida de paquetes aproximada al 12 %. Para distancias entre 10 y 15 km, la pérdida fue del 74 %. Las pérdidas se asocian principalmente a los obstáculos entre el transmisor y receptor. En el mar la tasa de éxito fue del 62 % con un alcance entre 15 y 30 km.

En [4] se compara el rendimiento de la modulación LoRa y FSK en exteriores. El ambiente está caracterizado por tener árboles, edificios y ser un terreno irregular. El dispositivo transmisor se ubica sobre un techo a una altura de 22 metros. Para la modulación LoRa se configuró los parámetros: SF de 10, un BW de 250 KHz y una CR de 4/6, lo que establece la tasa de datos de 1.6 kbps. El experimento se hizo con 3 tipos de carga útil diferentes, 10, 50 y 100 bytes. Las 3 cargas presentan un comportamiento similar en cuanto a valores de RSSI y PER. El PER es mayor al 10 % cuando la distancia está entre 7 y 8 km. En la Figura 3.1 se muestra de forma gráfica los resultados del RSSI. Para la prueba con FSK, se tuvo dos cargas, una de 16 y otra de 64 bytes. Con estas dos cargas, el RSSI fue similar y el PER llegó al 96 % a distancia menores a 2 km.

En [58], se verifica el rendimiento de LoRaWAN en ambientes interiores. Este estudio se realiza en un hospital. El gateway se ubica en el techo del edificio y se realizan pruebas con nodos en los 4 pisos del edificio. El edificio tiene paredes gruesas y paneles de vidrio que separan las áreas abiertas. La configuración está planificada para todos los SF con codificación 4/5 y un BW de 125 kHz. Se demuestra que el tiempo de transmisión aumenta significativamente cuando aumenta el SF, esto sucede incluso para cargas útiles pequeñas. El tiempo de transmisión del nodo al gateway es demasiado extenso por lo que no es recomendable para aplicaciones críticas. La propagación de la señal se ve afectada por la distancia entre nodo y gateway y por los elementos de la edificación (paredes, escritorios, vidrios). En cada experimento se envían 50 paquetes. Se pierden más paquetes en el piso 2 que en el 1, la razón es la ubicación del nodo en una zona de muchas paredes. El autor recomienda utilizar múltiples gateway con distintas ubicaciones para reducir el índice de pérdidas.

En [5] se propone un sistema de riego inteligente basado en LoRa. El sistema está formado por nodos de riego, gateway y un servidor en la nube. El nodo de irrigación está compuesto

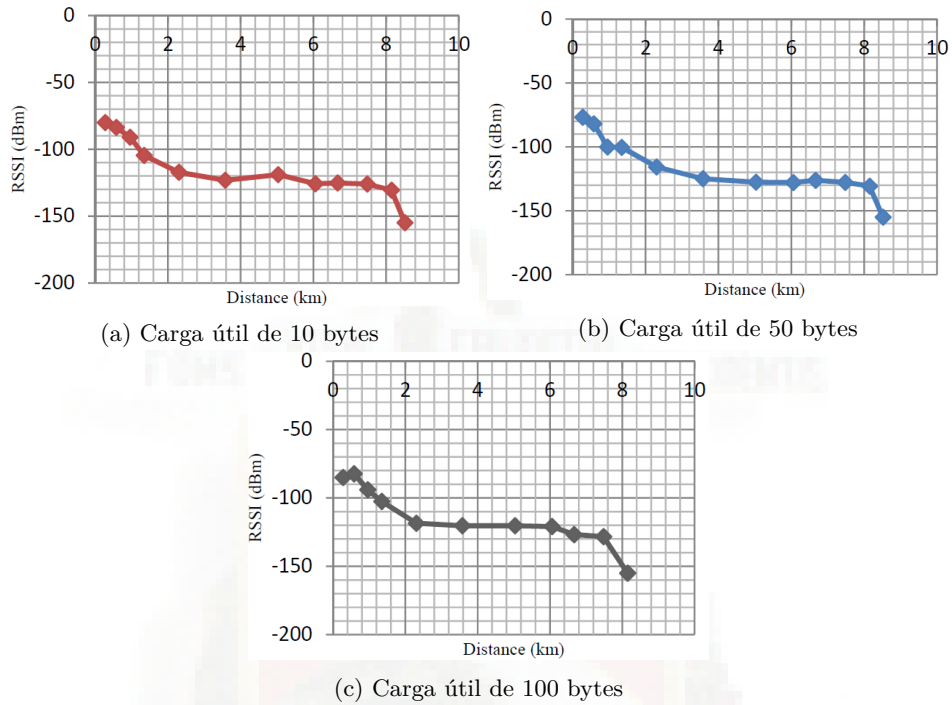


Figura 3.1: Valores RSSI de modulación LoRa [4]

por un módulo de comunicación [LoRa](#), una válvula solenoide y un generador hidroeléctrico. El nodo de irrigación es responsable de controlar e informar sobre el estado de la válvula solenoide, dicha información se envía a la nube a través del *gateway*. El sistema puede ser controlado remotamente por aplicaciones móviles. Los resultados experimentales muestran que tanto la distancia de transmisión como el consumo de energía en el sistema propuesto son confiables, el sistema propuesto es confiable. En la Figura 3.2 se muestra la arquitectura del sistema. Los usuarios pueden obtener el estado de los nodos de riego en el campo a través de una aplicación, y también pueden controlar el sistema de riego mediante el envío de comandos de control a través de la misma aplicación. El experimento de la distancia de transmisión se lleva a cabo en el entorno urbano típico de Beijing. El *gateway* está ubicado en el techo del edificio. Las mediciones se hacen cada 0.5 km hasta los 7 km. Se determina la calidad del enlace ascendente analizando el [RSSI](#) y el [SNR](#). Los parámetros establecidos en el nodo son: Potencia de transmisión 20 dBm, tasa de codificación 4/5 y [SF](#) 12. Los autores determinaron que el [RSSI](#) disminuye bruscamente hasta 0.5 km y luego tiende a ser estable en los 7 km restantes. El [SNR](#) disminuye 20 dB en el primer kilómetro de distancia, luego disminuye lentamente hasta los 7 km. Cuando el [SNR](#) está por debajo de -16.5 dBm y el [RSSI](#) es menor a -118 dBm, el *gateway* ya no recibe más paquetes del nodo.

En [59] se plantea una aplicación en la que se colocan sensores en el cuerpo para medir determi-

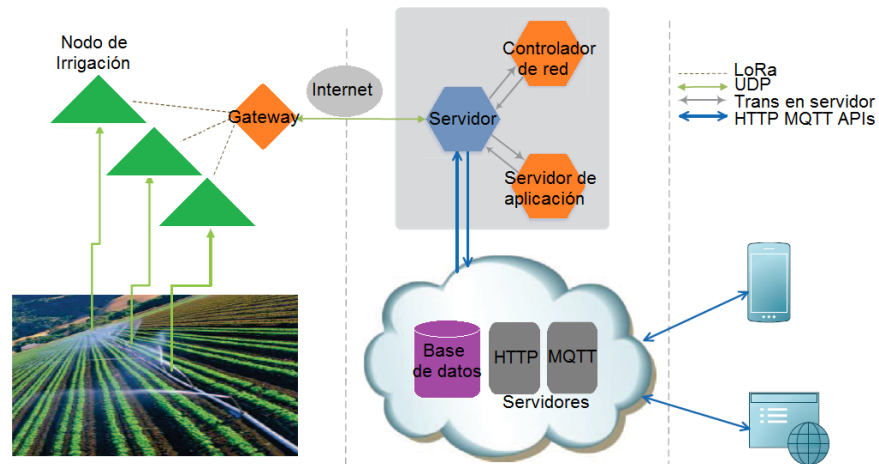


Figura 3.2: Arquitectura del sistema [5]

nados parámetros de salud. La información recopilada se envía a un servidor mediante una red **LoRaWAN**. La campaña de mediciones se realizó en un campus universitario con una extensión de 570 m de largo por 320 m de ancho que consta de numerosos edificios. Los edificios están contruidos en su mayoría por concreto, vidrio y metal. Se conectó un nodo al brazo de un investigador. El nodo se configuró para enviar datos periódicamente a la estación base, la cual se colocó en una torre de antenas de la universidad. La antena se ubicó a una altura de 24 m. Durante 10 días que duró el experimento, el investigador siguió su rutina diaria moviéndose por la universidad a una velocidad promedio de 5 km/h. Es importante establecer los parámetros bajo los cuales se realizó el experimento, **SF** 12, **BW** 125kHz, (**Data Rate (DR)**) 293 bps, y **PTx** 14 dBm. El objetivo de estas condiciones fue la de tener un mayor alcance. Se transmitieron de 300 a 1800 paquetes desde diferentes lugares. El rango de paquetes correctos fue de 96.7 % cuando el investigador estaba en reposo y cuando estaba en movimiento, la tasa de éxito alcanzó el 95 %.

Por su parte, [6] proporciona un análisis sobre el impacto de los parámetros de capa física en el rendimiento de las redes **LoRa** en una granja con árboles. El experimento se realiza en una granja de EEUU que se describe como una pradera plana con pequeñas colinas en el centro de la propiedad. La temperatura promedio es de 25°C , y la humedad del 70 %. Los árboles son de arce, roble y pino de mediana edad, los cuales están dispuestos en hileras separadas 2.5 metros entre ellas. La longitud del carga útil es de 9 bytes y se hacen transmisiones cada 3.5 segundos. Cada nodo se coloca a 100 m, 150 m y 200 m de distancia. Las distancias de cobertura medidas, fueron más pequeñas de lo esperado; sin embargo, se pudo determinar que con una configuración de **SF** 9 y **CR** 8 se garantiza un rango de comunicación de 200 m en este ambiente. La variación del **SF** y **CR** demostró una clara afección al rendimiento de la comunicación, el **BW** tuvo el menor impacto. Para obtener una alta confiabilidad en grandes

distancias, es importante mantener un alto valor de [SF](#) y [CR](#). En la Figura 3.3, se muestra el nivel de [RSSI](#) obtenido a diferentes distancias en una granja de árboles.

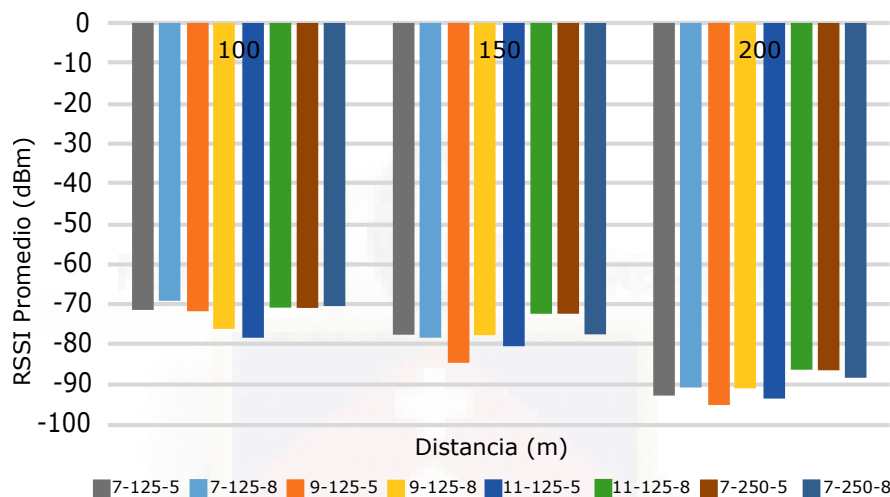


Figura 3.3: RSSI medido a diferentes distancias y configuraciones (SF-BW-CR) [6].

Otras tecnologías se combinan con [LoRa](#) para aprovechar sus virtudes y poder potenciar diferentes aplicaciones. En este contexto, [60] plantea que en una red se tienen diferentes dispositivos donde unos proveen cantidades de información más grandes que otros. Es posible hacer un consumo más eficiente de la energía si no se envían datos grandes y pequeños con el mismo [DR](#). Específicamente, los autores tratan un incidente en el mar, que requiere información de detección de las corrientes oceánicas (velocidad y capacidad), información de ubicación y datos multimedia. Para ello propone implementar un módulo de interfaz múltiple que utiliza tanto tecnología ([Wireless Fidelity \(WiFi\)](#)) como [LoRa](#). [WiFi](#) permite largo alcance y alto [DR](#) pero consume un alto nivel de energía. [LoRa](#) por su parte consume un bajo nivel de energía y tiene un largo alcance, pero su [DR](#) es bastante limitada. Mediante unas tarjetas Mini PCI se da la capacidad [WiFi](#) para alcanzar hasta 50 km de alcance. El dispositivo [LoRa](#) utilizado es el transceptor SX-1272. A nivel de software se tiene un programador de energía y datos, el cual elige entre [WiFi](#) y [LoRa](#). La discriminación de la tecnología se hace en función de los datos que los sensores desean transmitir.

3.3. Conclusiones

Los estudios que se han mencionado en este capítulo muestran las ventajas de la tecnología [LoRa](#), las aplicaciones y los resultados de las mismas. Los estudios buscan en general, determinar el efecto de aplicar diferentes configuraciones de capa física a la cobertura y confianza que puede brindar [LoRa](#).



En base a este conjunto de estudios se concluye que **LoRa** es la tecnología que mejor se adapta a aplicaciones donde es necesario transmitir datos desde nodos sensores muy lejanos. Es de simple implementación y bajo costo.

El rendimiento de una red **LoRa** está determinado por los parámetros configurados en el equipo y por el ambiente en que se realicen las transmisiones. Las edificaciones y la vegetación son obstáculos que pueden afectar el rendimiento de la comunicación.

El alcance de una transmisión se ve afectado también por el esquemas de modulación y co-dificación que se utilice. **LoRa** ha mostrado mejores prestaciones de cobertura comparado con **FSK**.

La potencia de transmisión se somete a las regulaciones de cada país, en los casos revisados por lo general se utiliza 14 dBm, pero este valor dependerá de la aplicación específica que se requiera solventar.

Es importante además tener en cuenta las antenas utilizadas y la ganancia que tengan. En los artículos revisados, este valor está entre 2 y 8dBi.

El **DR** depende del valor de **SF**, a mayor **SF** menor **DR**. En los estudios mostrados, se usan valores altos de **SF** con el fin de tener mayor sensibilidad en el receptor aunque a consecuencia se tenga menor tasa de datos efectiva.

Con respecto al ancho de banda el valor más común es 125 KHz seguido por 250 KHz.

Por otra parte, el máximo alcance obtenido en los estudios revisadas es 30 km con línea de vista en el mar.



Capítulo 4

Metodología

En este capítulo se describe la metodología de manera técnica, se incluyen las características de los dispositivos utilizados, la disposición física de los mismos, los ambientes elegidos y la metodología utilizada para realizar la campaña de mediciones y su posterior análisis.

4.1. Introducción

El desarrollo del presente proyecto requiere que la información sea contrastada en campo, utilizando equipos que permitan obtener la información necesaria. Se busca comprobar la funcionalidad y versatilidad de la tecnología [LoRa](#) en ambientes rurales abiertos. Parámetros como la configuración de los equipos, la ubicación o la densidad de vegetación pueden influir en el desempeño de la transmisión de datos. El impacto que tienen los factores mencionados anteriormente, se ve reflejado en las variables [RSSI](#) y [PER](#), cuyos valores obtenidos, son evaluados en el Apéndice [B](#).

4.2. Descripción del equipo para el desarrollo del proyecto

Para desarrollar este proyecto se requiere equipos con los cuales se pueda realizar la adquisición de datos y la interpretación de los mismos. Se plantea el uso del kit de evaluación de Microchip [LoRa](#) 900 en conjunto con la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi v3 modelo B.

4.2.1. Raspberry Pi v3 modelo B

La Raspberry Pi es un ordenador de tamaño reducido, utilizada para desarrollar aplicaciones que requieren un nivel de procesamiento considerable a un bajo costo [4.1](#).

Raspberry corresponde al grupo de computadores denominados ordenadores de placa reducida, y aunque fue inicialmente diseñada para proyectos educativos en Reino Unido ha logrado extenderse a proyectos más fuertes por la versatilidad y capacidad de procesamiento con el que cuentan [\[61\]](#). En la Tabla [4.1](#) se mencionan sus principales características.

Procesador	Broadcom BCM2837 1.2 GHz 64-bit		
Memoria	1 GB SDRAM		
Conectividad inalámbrica	IEEE 802.11.b/g/n Bluetooth 4.1		
Conectividad de red	Fast Ethernet 10/100 (RJ-45)		
Puertos	DSI (pantalla táctil) GPIO 40 pines	Micro SD HDMI	Micro USB 4 x USB 2.0

Tabla 4.1: Características de Raspberry pi v3 model B.



Figura 4.1: Ordenador Raspberry Pi v3 model B [\[7\]](#)

Raspberry Pi presenta la ventaja de tener un sistema operativo propio basado en Linux y existe una gran cantidad de documentación sobre el funcionamiento del equipo. Dos de estos dispositivos se utilizaron en este proyecto, el primero se encarga de enviar los comandos **MAC** al módulo RN2903 en el nodo final y el segundo trabaja como un servidor de red.

4.2.2. Kit de Evaluación de Microchip LoRa 900

Este kit permite crea una red de demostración autónoma que hace que la prueba de la red LoRa sea rápida y fácil.

El kit de evaluación facilita a los clientes realizar pruebas de la tecnología **LoRa**, su rango de cobertura y la velocidad de transmisión de datos. El kit se compone de una tarjeta *gateway* y dos nodos finales RN2903. El *gateway* dispone de una ranura micro SD para datos de configuración, conexión Ethernet, una antena de 915 MHz y una pantalla LCD. En la Figura 4.2 se muestra el kit completo.



Figura 4.2: Kit de Evaluación LoRa 900 [8]

El *gateway* está constituido por dos tarjetas, una tarjeta *Gateway Core* y una tarjeta *Gateway*

Radio. A continuación se detalla los elementos del kit de manera individual:

- **Tarjeta Gateway Core LoRaWAN**

Es el núcleo central, en ella se alojan los comandos básicos de configuración que pueden ser cargados de dos maneras: mediante un conector micro-USB o introduciendo una tarjeta micro SD.

Esta tarjeta recibe los datos captados por la placa de radio y los lleva hacia el procesador del dispositivo, el cual ajusta la información a una estructura de paquetes para ser enviada via ([Transmission Control Protocol-Internet Protocol \(TCP-IP\)](#)). También dispone de un conector Ethernet para la comunicación entre el *gateway* y el servidor de red. Se utiliza un cable USB para la alimentación que se encuentra regulada a 5V.

La configuración de la tarjeta implica implementar algunos parámetros básicos:

- Identificadores de *gateway* (ID Gateway)
- Método de *gateway* (Gateway Method)
- Dirección IP
- Red de trabajo
- Máscara de subred
- IP del servidor
- Puerto de enlace del servidor

El elemento se muestra en la Figura 4.3.

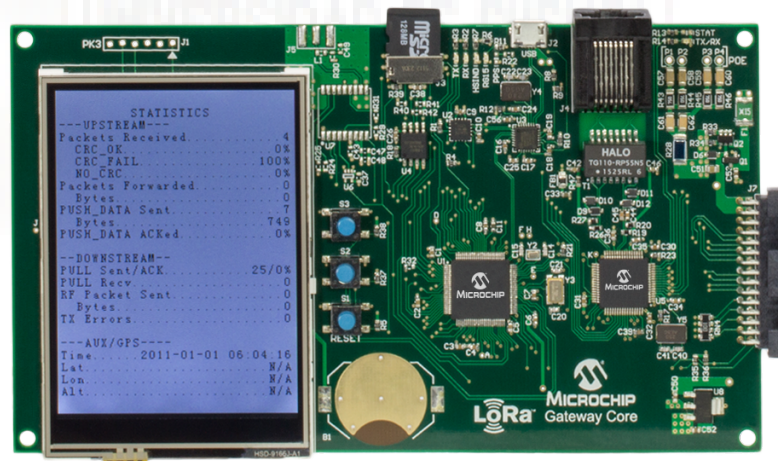


Figura 4.3: Tarjeta Core Gateway de LoRa [8].

- Tarjeta Radio Gateway LoRaWAN

La tarjeta de radio *gateway* captura los paquetes de enlace utilizando para ello dos transceptores Semtech SX1257 y se procesan en el chip SX1301. Por otra parte, el microprocesador interno de esta placa de la serie PIC24 se encarga de modificar los parámetros en el firmware. Microchip especifica varios modelos de placas de radio *gateway*, cada uno cumple con distintas especificaciones de frecuencia, el equipo utilizado en este proyecto trabaja en una frecuencia central de 915 MHz. Este dispositivo se visualiza en la Figura 4.4.

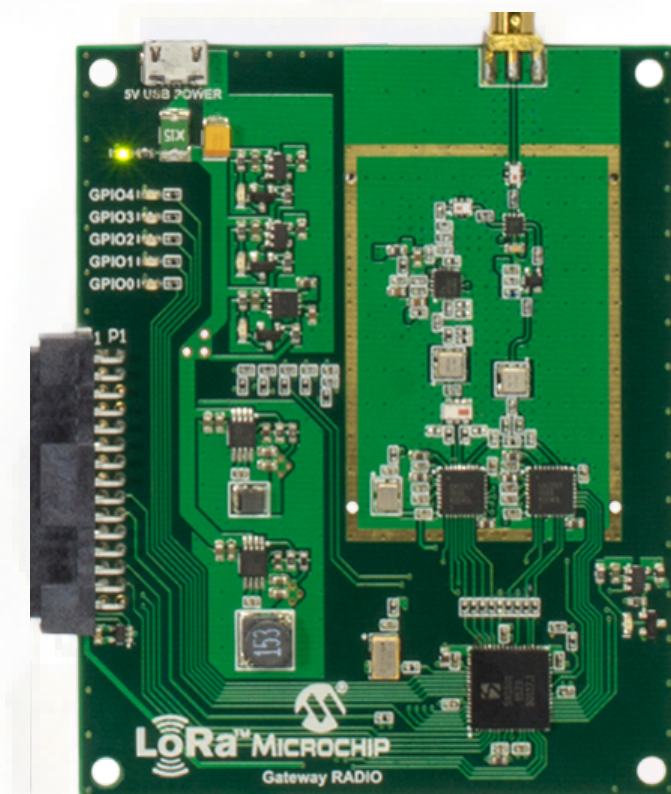


Figura 4.4: Tarjeta de Radio Gateway LoRa [8].

- **Nodo RN2903**

Es un dispositivo final **LoRaWAN** Clase A, dotado de un interfaz USB estándar, sensores de luz y temperatura. Los tiempos de transmisión pueden ser configurados en modo manual o programado. Puede ser un nodo autónomo alimentado por una batería, lo que lo hace muy útil para aplicaciones en campo. Este elemento se puede observar en la Figura 4.5.



Figura 4.5: Dispositivo LoRa RN2903 [9]

4.3. Arquitectura de red propuesta

La tecnología **LoRa** soporta topologías de tipo estrella donde los dispositivos finales se pueden comunicar directamente con una estación base o un *gateway* [59]. De forma general, el procedimiento de comunicación es transmitir los datos desde el nodo al servidor de red utilizando para ello una conexión IP estándar. El *gateway* es un intermediario transparente en la comunicación entre el nodo y el servidor de la red. El administrador de los dispositivos de la red es el servidor. El esquema general de la red que se utilizará en este proyecto se muestra en la Figura 4.6.

La comunicación entre la placa Raspberry y el módulo transmisor RN2903 se da a través del interfaz UART. En el receptor, el *gateway* **LoRa** transforma la información del interfaz física **LoRa** en paquetes IPv4. El *gateway* utiliza el interfaz Ethernet para comunicarse con el servidor, implementado en otra placa Raspberry.

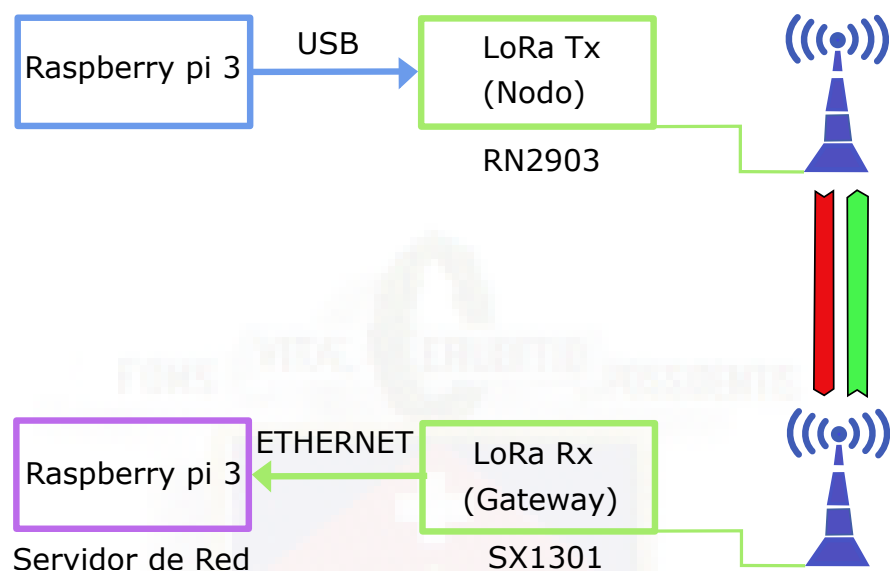


Figura 4.6: Disposición física de los dispositivos.

4.4. Descripción del ambiente de investigación

El experimento se realiza en la granja Irquis y en lotes aledaños para abarcar un área de evaluación más extensa. La granja Irquis pertenece a la Universidad de Cuenca y se caracteriza por tener baja densidad de árboles de pino, vegetación de mediana y baja altura. En la Figura 4.7 se muestra una vista superior del área de estudio.

La granja tiene aproximadamente 5km^2 , que incluye una parte montañosa y una zona dedicada al pastoreo de animales. La granja Irquis, se encuentra ubicada en el kilómetro 23 de la vía Cuenca – Girón, en la parroquia Victoria del Portete a 2663 msnm. La granja tiene un clima cambiante a lo largo del día; sin embargo, se puede decir que en general es templado frío. La temperatura media anual es de 14°C [62]. La superficie aproximada del área en donde se toman los datos es de $1,28\text{km}^2$ y no de toda la granja, ya que el resto de la misma es bosque y por tanto, no es una zona de interés para este proyecto.

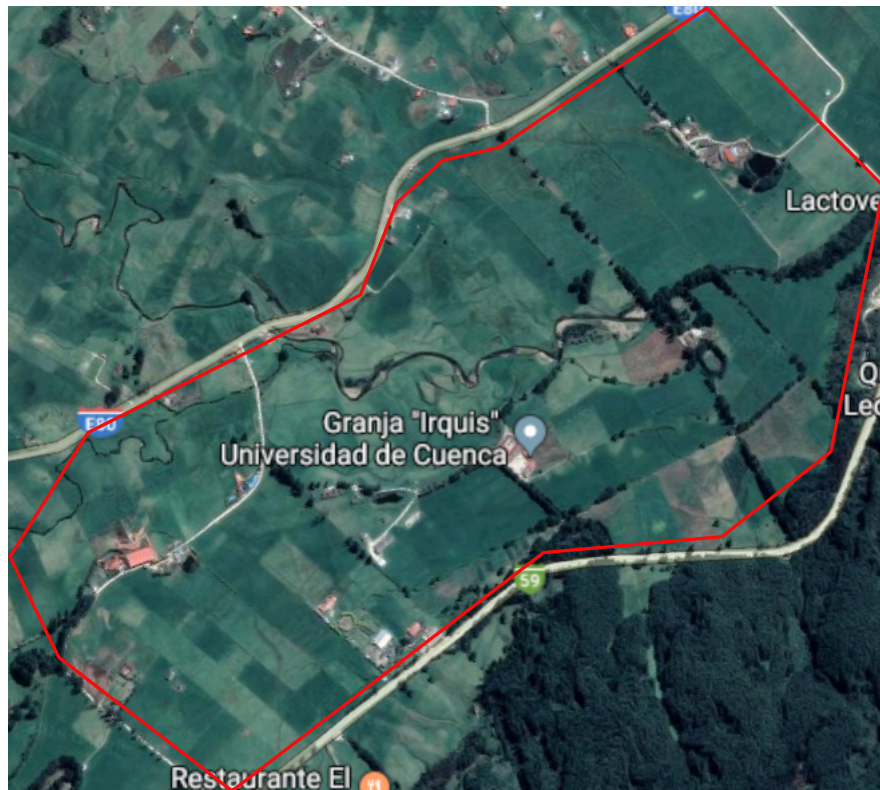


Figura 4.7: Mapa del área de estudio.

4.5. Método de adquisición de datos

Se busca un método para realizar las mediciones, de modo que permita cubrir toda el área de estudio de manera eficiente. Para ellos se plantean inicialmente dos métodos de adquisición de datos.

El primer método analizado se fundamenta en la adquisición de los datos de forma lineal [63]. Se coloca uno de los dos equipos (nodo o *gateway*) en un lugar fijo mientras el otro dispositivo se desplaza de forma lineal a los puntos requeridos para realizar las mediciones. Este método no permite cubrir toda el área de estudio, sino simplemente una franja. Además no contempla árboles y objetos que se encuentren en una dirección distinta a la línea de mediciones.

Un segundo método es realizar la toma de datos de forma radial [10]. Se dispone del *gateway* en la zona central del campo y el nodo se ubica a una determinada distancia para luego desplazarse de forma radial al rededor del *gateway*. Repitiendo el proceso a diferentes distancias del *gateway* se puede cubrir toda el área requerida.

La segunda opción es la que mejor se ajusta a las necesidades de este proyecto, ya que de este modo se puede abarcar una gran extensión de manera ordenada. Además, se tiene la ventaja de que en la granja se dispone de tres torres de aerogeneradores de pequeña potencia. Estas torres están ubicados aproximadamente en el centro del área de estudio y tienen una altura de 24 m.

El método a utilizar consiste en colocar el *gateway* en una de las torres a una altura de 10 m y el nodo transmisor es el que se desplaza de forma radial. El punto más alejado desde la torre se encuentra a 1050 m por lo que se considera conveniente realizar radios cada 50 m. Los puntos de transmisión se ubican en cada radio separados 22.5° hasta completar los 360° que representa cubrir toda el área de estudio. En la Figura 4.8 se representa de manera gráfica el método de adquisición de datos descrito.

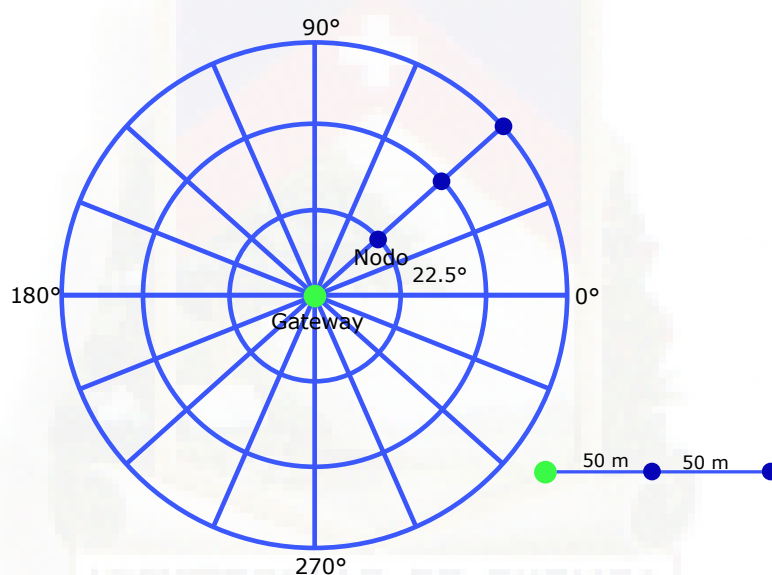


Figura 4.8: Ubicación de dispositivos nodo y gateway [10].

4.5.1. Coordenadas de los puntos de Transmisión

Para poner en práctica el método de mediciones es necesario ubicar en campo los puntos de transmisión. En la granja se dispone de tres puntos que han sido georeferenciados previamente. A partir de dichos puntos y con la ayuda de una Estación Total y un prisma, se determina las coordenadas de la torre donde se ubica el *gateway* y todos los puntos de transmisión. En la Tabla 4.2 se muestra las coordenadas geográficas de los puntos de referencia iniciales.

En la Figura 4.9 se muestra la posición específica de los puntos de referencia inicial y en el Apéndice C.1 se detallan las coordenadas geográficas de todos los puntos de transmisión.

ID	Coordenadas Geográficas	Elevación (m)
1	3° 04' 48.4" S 79° 04' 31.8" W	2652.76
2	3° 04' 44.7" S 79° 04' 35.4" W	2641.89
3	3° 04' 43.8" S 79° 04' 38.4" W	2642.42
4 - Torre	3° 04' 51.5" S 79° 04' 38.5" W	2656.17

Tabla 4.2: Coordenadas geográficas de puntos de referencia.

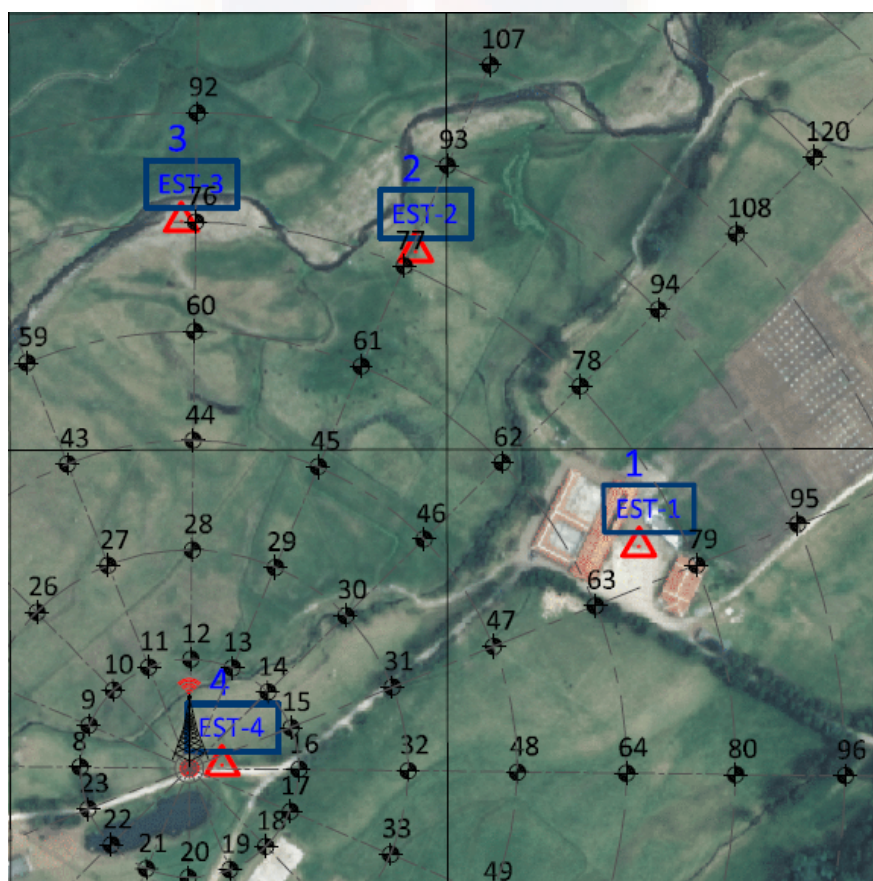


Figura 4.9: Ubicación de los puntos de referencia.

Para cubrir toda el área se necesita tener 180 puntos de transmisión distribuidos en 16 radios. Un radio está definido por todos los puntos que se hallan en línea recta desde el *gateway* hasta los límites del área de estudio, recordando que están equidistantes cada 50 m. Tras ubicar el

punto en campo, se procede a realizar la transmisión y también se toma la altura para realizar un perfil topográfico de cada radio. El perfil topográfico servirá para interpretar los datos de las mediciones y determinar cómo el relieve del terreno afecta a la comunicación. En la Figura 4.10 se muestra una parte de los puntos ubicados en el terreno. En el Apéndice C.3 se muestra el mapa completo.

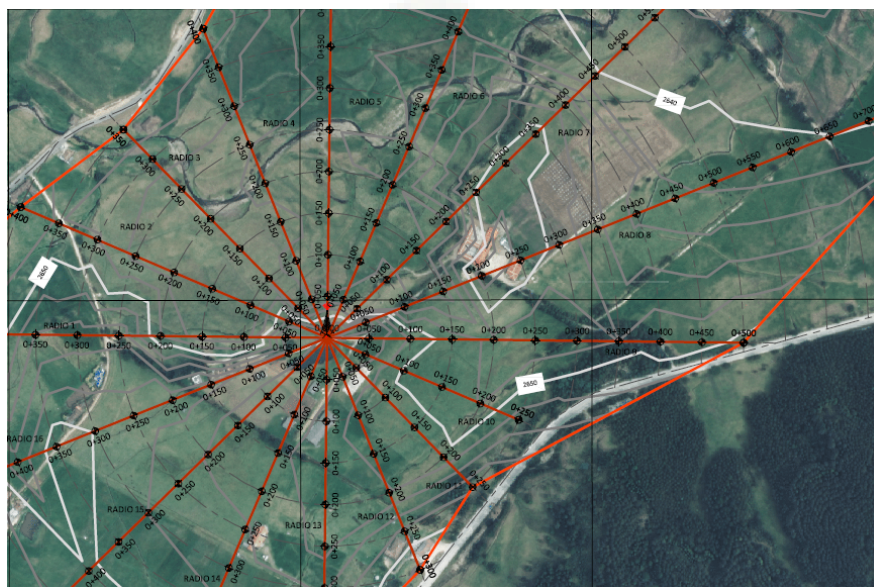


Figura 4.10: Posición de puntos para ubicación del equipo transmisor.

Por su parte, en la Tabla 4.3 se presenta la distribución de los puntos de transmisión en cada radio. No todos los radios tienen la misma cantidad de puntos dada la forma poligonal del terreno; sin embargo, varios radios presentan características similares en cuanto a relieve y cantidad de obstáculos se refiere.

4.5.2. Descripción del ambiente correspondiente a los radios R2 a R6

El perfil geográfico del ambiente conformado por estos radios, tiene la característica de encontrarse aproximadamente a 12 metros por debajo de la base de la torre donde se ubica el *gateway*. Esta característica es importante ya que la línea de vista entre equipos influye en la transmisión. Adicionalmente, la vegetación es escasa en este ambiente.

A manera de ilustración, en la Figura 4.11 se presenta el perfil topográfico de R5. Este radio muestra la regularidad del terreno a lo largo del mismo.

Radio	Distancia Max [m]	Cantidad de puntos
1	550	11
2	400	8
3	350	7
4	400	8
5	650	13
6	1050	21
7	1050	21
8	850	17
9	500	10
10	250	5
11	250	5
12	300	6
13	400	8
14	650	13
15	700	14
16	700	14

Tabla 4.3: Distribución de puntos en cada radio.

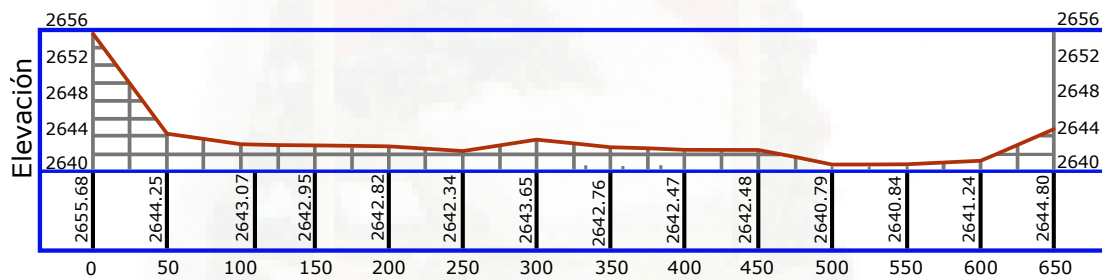


Figura 4.11: Perfil topográfico del Radio 5

4.5.3. Descripción del ambiente correspondiente a los radios R1 - R7 - R8 - R9

En este ambiente se tiene un perfil topográfico que puede generar algunos problemas en la recepción de la señal. Se tiene la presencia de vegetación, árboles grandes y un terreno irregular. Aproximadamente a partir de los 400 m de distancia desde la torre, el terreno presentan un hundimiento considerable. En la Figura 4.12 se muestra el perfil de R8.

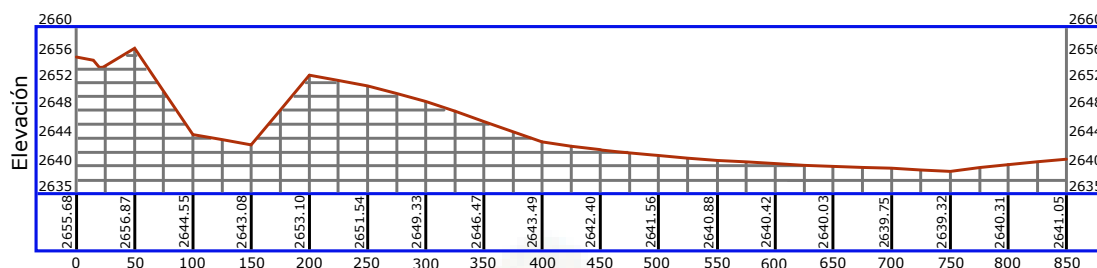


Figura 4.12: Perfil topográfico de R8.

4.5.4. Descripción del ambiente correspondiente a los radios R10 a R13

Los radios de este ambiente se encuentran en la parte trasera de la torre donde está colocado el *gateway*. Presenta algunas edificaciones construidas con ladrillo y de baja altura además de escasa vegetación. Una consideración de estos puntos del terreno, es que parte de ellos se encuentran en las zonas más altas respecto al área de estudio.

En la Figura 4.13 se muestra el perfil de R13, en él se puede observar las zonas altas de la granja a partir de los 250 metros.

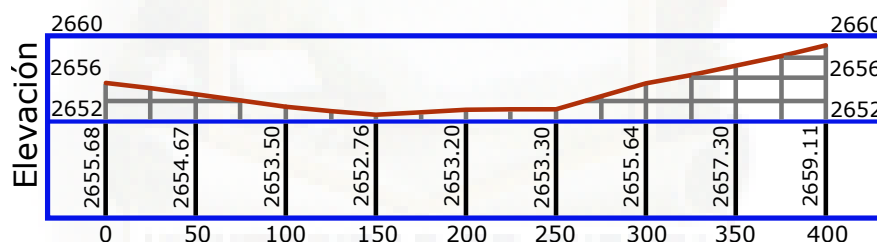


Figura 4.13: Perfil de R13

4.5.5. Análisis de ambiente correspondientes a los radios R14 a R16

Este ambiente tiene radios extensos, que no presentan mayores obstáculos. Es una zona que tiene una elevación con una línea de vista bastante despejada por lo que se puede pensar que los puntos ubicados en esta zona tendrán un buen nivel de señal de recepción.

En la Figura 4.14 se muestra el perfil topográfico de R15.

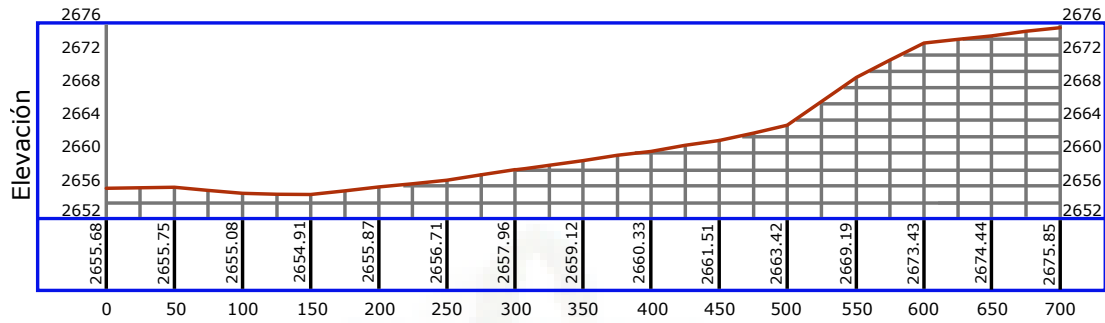


Figura 4.14: Perfil de R15

4.6. Parámetros de calibración de equipos

Para la implementación del proyecto se configuró el kit de evaluación LoRa 900 de Microchip con la máxima potencia de transmisión 18 dBm, un BW de 125 KHz. Se hizo combinaciones con dos SF y tres cargas útiles de 2 bytes, 6 bytes y 11 bytes respectivamente. Esto con el fin de determinar el comportamiento con cada uno y verificar si es relevante mencionarlo en la determinación del modelo de pérdidas a plantear. La cantidad de paquetes seleccionada para el análisis del PER es de 60, este valor fue analizado en el Apéndice A, en donde se determinó que cuando hay línea de vista (Line of Sight (LOS)) el PER guarda la misma relación con 60 paquetes o con una cantidad mayor. En este caso en la mayoría de la granja se tiene una zona de Fresnel bastante despejada. Además se considera el tiempo que toma cada transmisión, teniendo en cuenta que se tiene una gran cantidad de puntos.

La reducción de paquetes no repercute en la fiabilidad de los datos en valores mayores a -110 dBm de RSSI; sin embargo, en valores menores se enviarán 300 paquetes para aumentar la resolución del PER. En cada punto se transmiten 60 paquetes que están organizados como se muestra en la Tabla 4.4:

Cantidad de paquetes	Spread Factor	Carga útil
10	10	2
10	10	6
10	10	11
10	7	2
10	7	6
10	7	11

Tabla 4.4: Parámetros de configuración del Kit LoRa

4.7. Descripción del procedimiento de transmisión y adquisición de datos.

Para este caso, en primer lugar se encuentra la definición del sitio donde debe colocarse el transmisor. En el Raspberry Pi del nodo se implementó un script que permite iniciar una transmisión presionando un botón. Un indicador led advierte el momento en que inicia y finaliza una transmisión. El circuito de botón y led se conecta al Raspberry por medio del puerto GPIO, la programación de estos puertos se la realiza a través de una implementación en Java, en el mismo se realizan las configuraciones del nodo [LoRa](#). Las configuraciones y el código para la transmisión se detallan en el Apéndice [A](#).

En el Raspberry Pi que se usó como servidor, se implementó un código para poder visualizar en una pantalla la llegada de los paquetes. Entre los datos que se muestran en la pantalla está una numeración para poder llevar un control y asegurar que las transmisiones se realicen de manera exitosa. En el servidor se implementó un script en el lenguaje de programación Java, el cual permite recibir los paquetes IPv4 creados por el *gateway*, los descifra y los almacena en un archivo con extensión csv. El código utilizado para la implementación del servidor se detalla en el Apéndice [A](#).

Los datos recolectados fueron los valores asociados al número de paquetes no recibidos y el valor [RSSI](#).

4.8. Conclusiones

La evaluación del rango de transmisión depende de diferentes factores, entre ellos la configuración que se haga en los equipos. En este capítulo se ha descrito la configuración de los diferentes parámetros que se han utilizado para este trabajo.

El kit [LoRa](#) permite configurar los parámetros de transmisión, lo cual permite desarrollar procedimientos que se ajusten a diferentes necesidades, además de probar el kit completo y verificar todas las prestaciones del mismo.

El ambiente escogido para la toma de muestras de [RSSI](#) y [PER](#) obedece a la necesidad de implementar redes de [IoT](#) en ambientes rurales abiertos. Ecuador es un país en el que los procesos agrarios son muy comunes y de gran importancia, es por ello que la agricultura inteligente pueden ser un factor fundamental que impulse su desarrollo.

El procedimiento de medición se describe con detalles con el afán de que pueda ser validado y



contrastado en ambientes similares.

La ubicación de los puntos de transmisión está en función de la necesidad. Es por tanto, necesario aplicar una metodología adecuada para la toma de datos de modo que permita abarcar una gran área con diferentes características ambientales. Esto permite probar el funcionamiento y desempeño de los dispositivos que conforman la red [LoRa](#) bajo diversas condiciones.



Capítulo 5

Resultados: análisis de datos y ajuste del modelo basado en el RSSI

En este capítulo se presenta el análisis de los datos obtenidos en las campañas de medición sobre los parámetros [RSSI](#) y [PER](#). Se muestran los resultados de los objetivos planteados para este proyecto en el que principalmente se busca determinar un modelo de pérdidas de trayectoria en la granja de Irquis. Su importancia radica en mostrar la capacidad de implementar este tipo de tecnología en redes de sensores inalámbricos que puedan optimizar procesos agrícolas y agropecuarios.

5.1. Introducción

La interpretación de los valores de [RSSI](#) y [PER](#) aportan información importante de una transmisión. Como se ha observado en trabajos similares, mediante estos parámetros es posible establecer un modelo de pérdidas de trayectoria. El modelo permite, a su vez, estimar el rango de cobertura de una red de sensores que utilice tecnología [LoRaWAN](#). Para determinar este modelo se ha considerado la interpretación estadística de los datos recopilados en campo.

5.2. Predicción del RSSI

A partir de los valores de [RSSI](#) obtenidos en campo para cada punto georeferenciado, se realizó un mapa de predicción del valor de este parámetro en toda el área de estudio. Esto se hizo mediante la plataforma ArcGis aplicando un método de Kriging. Este método permite predecir un atributo en una ubicación no observada, basándose en los valores obtenidos en las muestras hechas en puntos conocidos.

Kriging es un método de interpolación que predice valores desconocidos a partir de datos observados en ubicaciones conocidas. Kriging usa el variograma para expresar la variación espacial. El problema clave de Kriging es la selección del modelo de variograma, que adjunta la precisión de interpolación espacial. De manera general, el modelo de variograma razonable se selecciona en función de las imágenes de la nube de la distribución del variograma. Se asume que los datos más cercanos a un punto conocido tienen mayor peso o influencia sobre la interpolación, influencia que va disminuyendo conforme se aleja del punto de interés [\[64\]](#).

Los valores obtenidos de la predicción se muestran de una manera gráfica mediante un mapa de calor el cual se indica en la [Figura 5.1](#) y el plano completo se detalla en el [Apéndice C.2](#). El modelo que mejor se ajusta a los datos, fue el esférico. Se puede observar que ciertamente las zonas donde se hallan los radios R2, R3, R4 y R5 son las que presentan un valor de [RSSI](#) más alto en relación al resto del mapa. Esto tiene sentido, ya que como se vio en el capítulo anterior, estos radios pertenecen a un ambiente donde existe una línea de vista totalmente despejada.

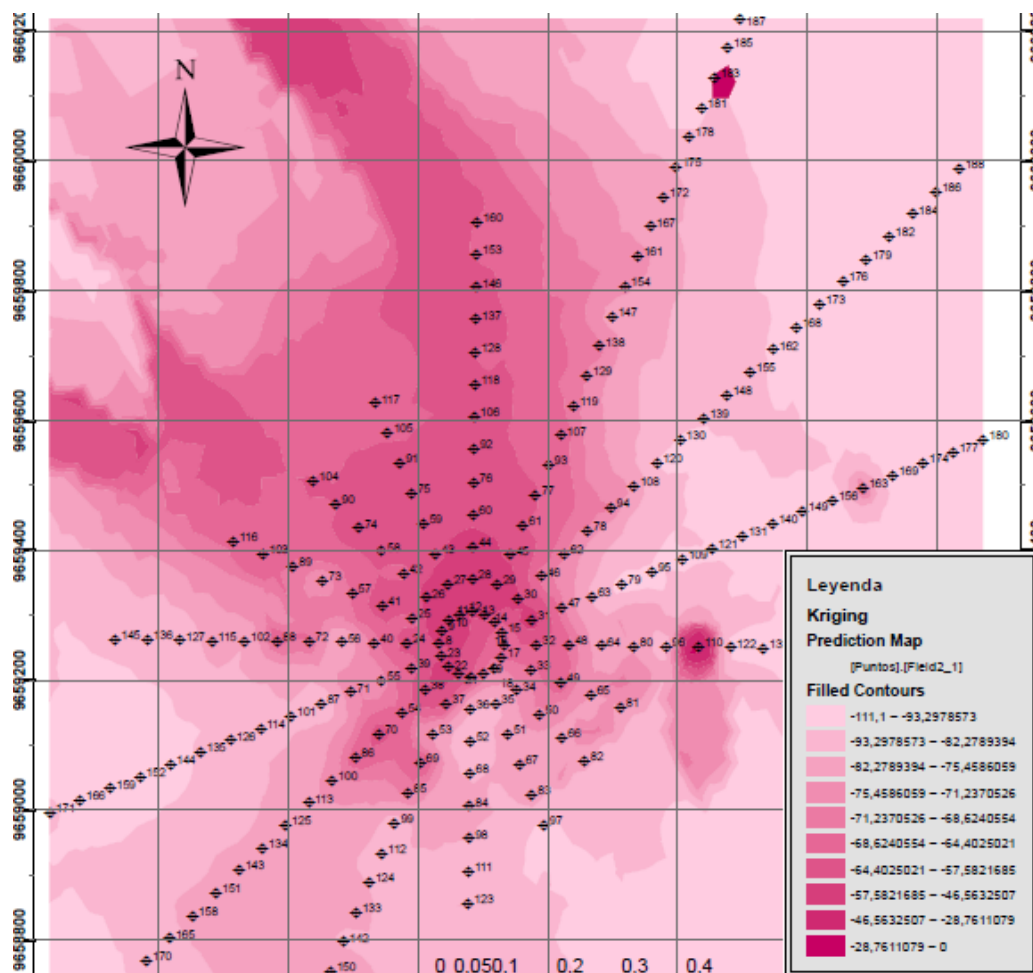


Figura 5.1: Mapa de calor predicción RSSI.

5.3. Proceso para obtener el modelo matemático

Tras la obtención de los datos transmitidos desde cada punto, se estableció el uso de métodos estadísticos para obtener un valor promedio del RSSI. Los valores promedio del RSSI se hicieron para cada una de las seis configuraciones detalladas en el capítulo anterior. Con los datos de cada punto, se graficó el RSSI de cada radio. De esta forma se pudo determinar hasta qué punto los valores eran válidos, es decir, mayores a -110 dBm. En las pruebas de laboratorio descritas en el Apéndice A, se determinó que valores menores a -110 dBm no son confiables para el cometido de este proyecto. En la Figura 5.2 se muestra la gráfica de los valores promedio de RSSI para R6. En tanto que en el Apéndice B.1 se muestra la gráfica para todos los radios.

En las gráficas se advierte en general tendencias semejantes del valor de RSSI a lo largo de

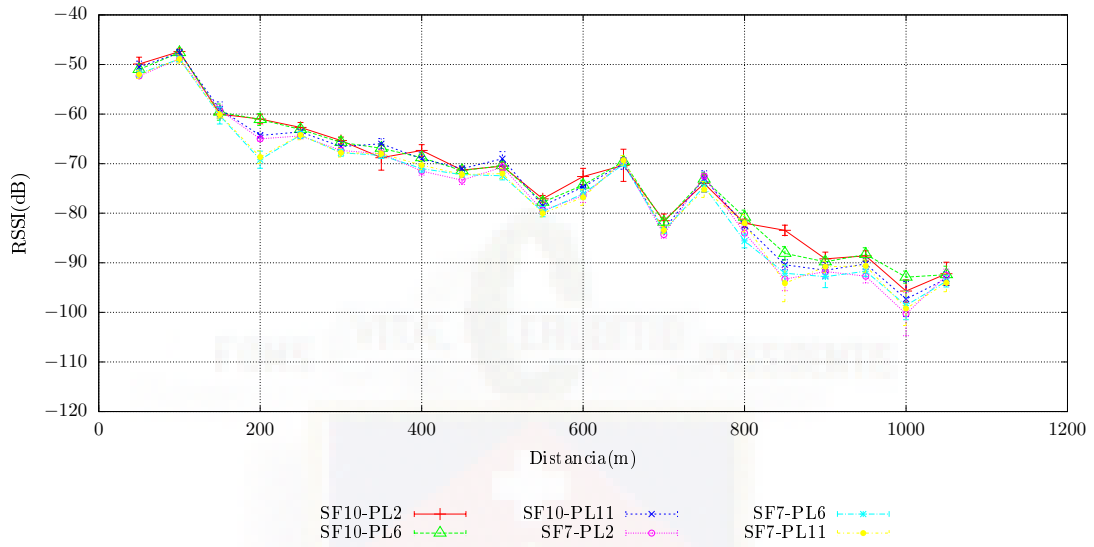


Figura 5.2: Valores promedio de RSSI de R6.

varios radios. Si al comparar todos los radios, estos presentan una semejanza estadística, se puede determinar un solo modelo para toda el área. Caso contrario habrá que identificar qué zonas se diferencian entre sí y definir un modelo para cada zona. Es necesario realizar una comparación estadística de los valores obtenidos del mismo experimento realizado en diferentes condiciones, es decir, la medición del RSSI en los diferentes radios.

Existen dos alternativas o métodos estadísticos diseñados específicamente para pruebas de hipótesis múltiples o comparación, las paramétricas y no paramétricas en función de sus respectivas suposiciones sobre la distribución de los valores. Si la distribución de los valores es normal se aplica una prueba paramétrica y de no ser el caso, se aplica una prueba no paramétrica.

Estas pruebas evalúan si la diferencia entre varios conjuntos de datos es estadísticamente significativa. La hipótesis nula implica que no existen diferencias significativas. Al rechazar la hipótesis nula, se indica que al menos un conjunto de datos presenta características estadísticamente diferentes.

Si se rechaza la hipótesis nula, se debe identificar específicamente qué grupos de datos son diferentes. Las pruebas *post hoc* permiten la identificación de estos conjuntos de datos [65].

5.3.1. Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov.

En primer lugar se busca determinar si la distribución es normal o no, y en función de ello de elegirá el tipo de prueba de comparación estadística. La prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov permite medir el grado de concordancia o relación existente entre la distribución de un conjunto de datos y una distribución teórica específica. Su objetivo es comprobar si una variable se distribuye normalmente. Si el resultado de la prueba devuelve un nivel de significancia menor a 0.05 entonces no corresponde a una distribución normal, mientras que si este índice es mayor a 0.05 la distribución se considera normal [66].

Para realizar esta prueba, se ha utilizado la plataforma de análisis estadístico SPSS. Dado que se quiere comparar los radios, se toma como un conjunto de datos las mediciones válidas del parámetro RSSI para cada radio. Tras realizar la prueba de Kolmogorov-Smirnov en SPSS se obtuvo los resultados indicados en la Tabla 5.1:

Kolmogorov-Smirnov			
	Estadístico	gl	Significancia
RSSI	0.095	10193	0.000

Tabla 5.1: Valores obtenidos de la prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov.

El nivel de significación es menor a 0.05, por lo tanto, no corresponde a una distribución normal. Al ser una población no paramétrica se procede con un método de comparación por parejas para este tipo de datos.

El método de comparación para poblaciones no paramétricas Kruskal Wallis permite determinar si existe una diferencia estadísticamente significativa comparando todos radios por parejas.

5.3.2. Prueba de Kruskal Wallis

Para esta prueba, la hipótesis nula define que las medianas de la población son similares, frente a la alternativa de que hay una diferencia entre al menos dos de ellas [67].

Para resolver la existencia de patrones de comportamiento de las mediciones de RSSI, se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis en la plataforma SPSS. Si dicha prueba resultase significativa (significancia $<0,01$), implica que estadísticamente los valores de RSSI de al menos un radio son diferentes al resto. Pero esta prueba no especifica qué radio es el que difiere. Por ello, sería necesario realizar pruebas *post hoc*.

El resultado que se obtuvo al ingresar los valores de RSSI de los 16 radios, fue un nivel de significancia (Sig) de 0, por lo cual se rechaza la hipótesis nula y se concluye que la distribución del RSSI es diferente entre al menos un par de radios y para identificarlos es necesario una prueba textitpost hoc. En la Tabla 5.2 se muestra el resultado de esta prueba.

Resumen de contraste de hipótesis			
Hipótesis Nula	Prueba	Sig	Decisión
La distribución de RSSI es la misma entre las categorías de radios	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	0.000	Rechaza la hipótesis nula.

Tabla 5.2: Contrastes de hipótesis para prueba de Kruskal-Wallis.

5.3.3. Test de Dunn

La prueba post hoc más utilizada con la prueba de Kruskal-Wallis es el test de Dunn. Esta prueba permite conocer entre qué pares de radios se tiene una diferencia estadística significativa y entre cuales no hay una diferencia significativa. Esto permite agrupar los radios entre similares y plantear un modelo para cada grupo [68].

La prueba de comparación múltiple de Dunn es una prueba no paramétrica *post hoc* que diferencia a través del análisis de la mediana. Las comparaciones se realizan en pares donde el nivel de significancia α se divide por el número de comparaciones realizadas [65].

La hipótesis nula establece que no hay diferencia entre dos conjuntos de datos (los conjuntos de datos pueden ser iguales o diferentes en tamaño). La hipótesis alternativa para la prueba es que hay una diferencia entre los grupos. La Figura 5.3 muestra el resultado obtenido de esta prueba realizada en la plataforma SPSS para la comparación de radios.

Los resultados del test permiten concluir que los radios R2, R3, R4 y R5 son semejantes entre sí y se diferencian de manera notable del resto de radios. A este grupo se lo llamará Grupo 1. Los resultados obtenidos para el resto de radios, muestra que se los puede considerar similares; sin embargo, el valor de significancia que existe entre varios radios, está cerca del umbral. Por ello se divide el resto de radios en dos grupos, cada grupo integrado por radios que se encuentran en ambientes con características similares.

El Grupo 2 está formado por los radios: R6, R7, R8, R9 y R16, por su parte, el Grupo 3 está conformado por los radios R1, R10, R11, R12, R13, R14 y R15. Se toma en cuenta esta diferencia entre los grupos ya que espacialmente también se puede observar que el Grupo 1 se refiere a los radios que se encuentran en la parte superior de la granja, mientras que los radios

Cada nodo muestra el rango promedio de muestra de Radios.

Muestra 1-Muestra 2	Estadístico de prueba	Error estándar	Estadístico de prueba estándar	Sig.	Sig. ajust.
16-13	2.833	51.911	.055	.956	1.000
16-12	11.792	56.305	.209	.834	1.000
16-7	41.077	46.325	.887	.375	1.000
16-14	77.269	46.325	1.668	.095	1.000
16-8	84.944	56.305	1.509	.131	1.000
16-11	93.033	59.588	1.561	.118	1.000
16-9	123.250	56.305	2.189	.029	1.000
16-1	134.045	48.017	2.792	.005	.629
16-10	164.933	59.588	2.768	.006	.677
16-15	182.768	45.643	4.004	.000	.007
16-6	194.671	43.230	4.503	.000	.001
16-2	388.115	51.911	7.477	.000	.000
16-4	445.344	51.911	8.579	.000	.000
16-5	447.571	46.325	9.661	.000	.000
16-3	479.607	53.838	8.908	.000	.000
13-12	8.958	57.696	.155	.877	1.000
13-7	38.244	48.006	.797	.426	1.000
13-14	-74.436	48.006	-1.551	.121	1.000
13-8	82.111	57.696	1.423	.155	1.000
13-11	90.200	60.903	1.481	.139	1.000
13-9	120.417	57.696	2.087	.037	1.000

Figura 5.3: Comparaciones de radios por parejas.

del Grupo 3 corresponden a los de la parte más lejana y con más obstáculos. Lo anterior se resume en la Tabla 5.3.

Grupo	Radios
1	2 - 3 - 4 - 5
2	6 - 7 - 8 - 9 - 16
3	1 - 10 - 11 - 12 - 13 - 14 - 15

Tabla 5.3: Distribución de radios en Grupos

Habiendo definido los 3 grupos, se reúnen los datos de los radios correspondientes y se hace un ajuste logarítmico de curva para cada grupo. Se implementa un script en Matlab que permita precisamente obtener los valores de los coeficientes necesarios para el ajuste logarítmico de una curva para los valores de RSSI en función de los valores medidos.

5.4. Ajuste logarítmico de los valores promedio de RSSI

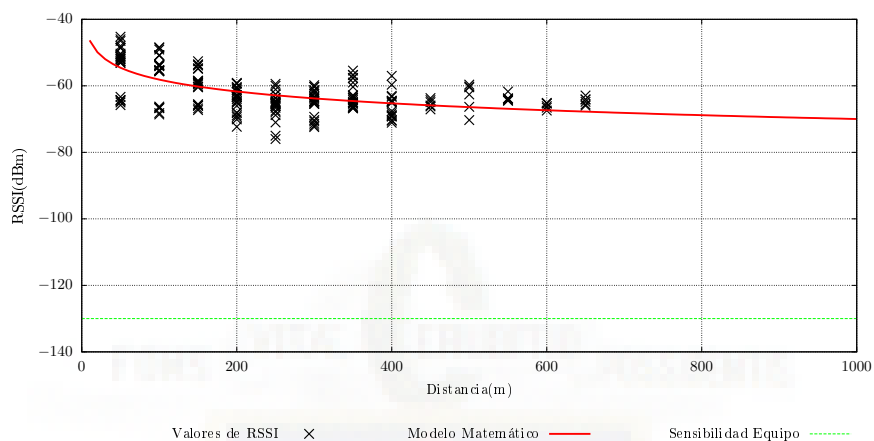
Por cada grupo se usarán los valores promedio de RSSI de todas las configuraciones para ajustar la curva de los datos de RSSI. El ajuste del RSSI se hace con la Ecuación 2.3 (cóncava hacia arriba), luego, con la Ecuación 2.4 del Capítulo 2, se despeja las pérdidas de trayectoria P_L que es el objetivo a alcanzar. Mediante el script de Matlab se establecen los coeficientes del modelo de pérdidas de trayectoria y la curva correspondiente (cóncava hacia abajo).

En la Tabla 5.4 se muestra el valor de cada uno de los coeficientes obtenidos para cada grupo de radios para el ajuste logarítmico de la curva del RSSI.

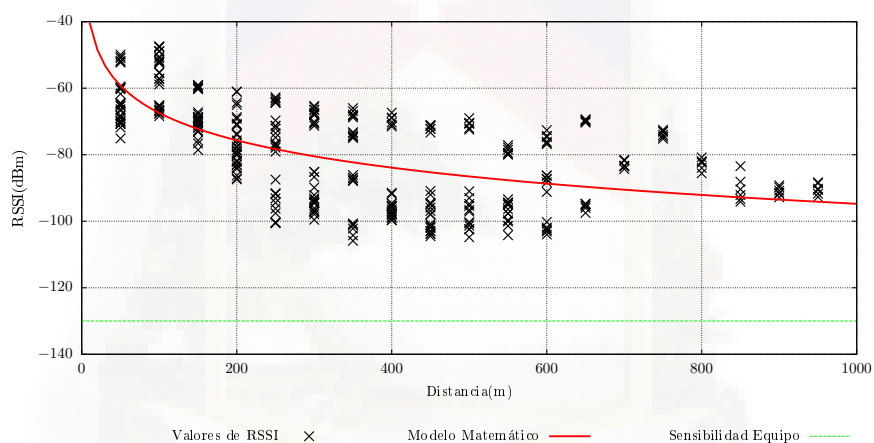
Coeficiente	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
a	-34.4193	-12.8263	-36.5668
b	-5.1473	-11.8594	-7.3577

Tabla 5.4: Coeficientes obtenidos a partir de las mediciones para el valor RSSI mediante ajuste logarítmico.

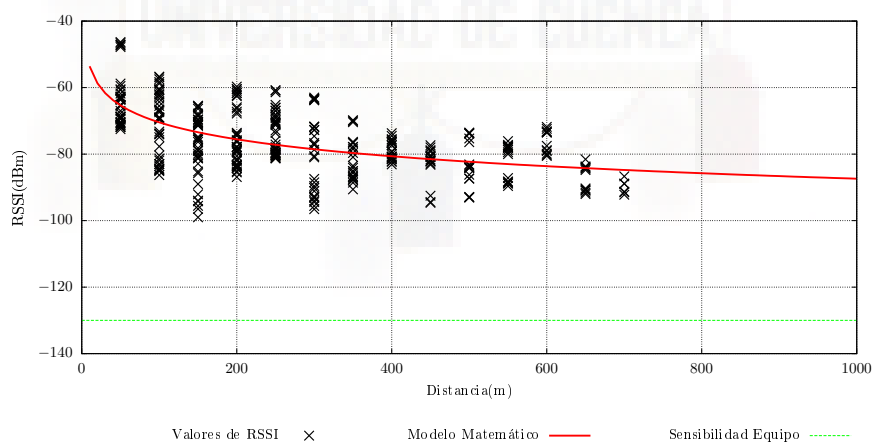
Los valores de RSSI promedio a usar para cada grupo se presentan en la Figura 5.4. Los puntos negros son los valores de las mediciones. Se puede observar que el ajuste logarítmico de la curva es bastante bueno. La línea verde corresponde a la sensibilidad del equipo que es -130 dBm.



(a) Grupo 1



(b) Grupo 2



(c) Grupo 3

Figura 5.4: Valores de RSSI promedios de cada grupo.

5.5. Generación de modelos de pérdida de trayectoria

El modelo de pérdidas de trayectoria se basa en la Ecuación 2.3, para realizar dicho ajuste se debe calcular las pérdidas de trayectoria en cada punto utilizando la Ecuación 2.4. Los valores utilizados para el cálculo de las pérdidas de trayectoria se muestran en la Tabla 5.5.

Constante	Valor
T_P (Potencia de Trasmisión)	18.43 dBm
G_t (Ganancia antena Transmisora)	0.2 dBi
G_r (Ganancia antena Receptora)	0.2 dBi

Tabla 5.5: Valores utilizados para calcular las pérdidas de trayectoria.

Por su parte, en la Tabla 5.6 se presentan los valores de las constantes del modelo de pérdida de trayectoria para cada grupo. En la Figura 5.5 se muestra el ajuste de la curva de pérdidas de trayectoria para cada grupo.

Coefficiente	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
a	53.2493	31.6563	55.3968
b	5.1473	11.8594	7.3577
x	4.8023	11.3941	8.0628

Tabla 5.6: Coeficientes obtenidos para los modelos de pérdidas de trayectoria.

Con fundamento en los valores obtenidos se tiene que la ecuación que modela el comportamiento para el área comprendida por los puntos que se encuentran en el Grupo 1 (R2 - R3 - R4 - R5) es la Ecuación 5.1 :

$$P_L(dB) = 53.2493 + 5.1473 \times \log(d) + 4.8023 \quad (5.1)$$

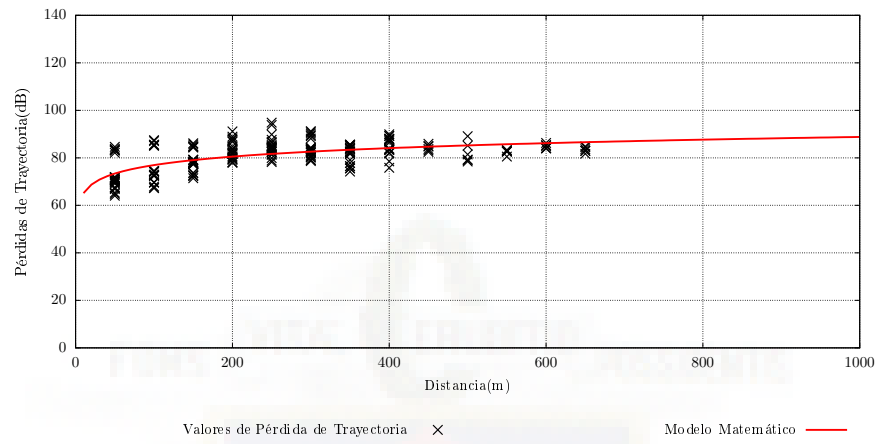
El ajuste del modelo para este grupo de radios se muestra en la Figura 5.5a. En él se pueden observar cómo las pérdidas pueden estimarse a distancias aún mayores a las establecidas por los radios correspondientes al grupo. Desde los 200 m de distancia hasta los 1000 m, las pérdidas oscilan entre 80 y 90 dB.

Para los valores del Grupo 2 (R6 - R7 - R8 - R9 - R16) la ecuación que modela las pérdidas de trayectoria con respecto a la distancia es la Ecuación 5.2. La gráfica de este modelo se muestra en la Figura 5.5b.

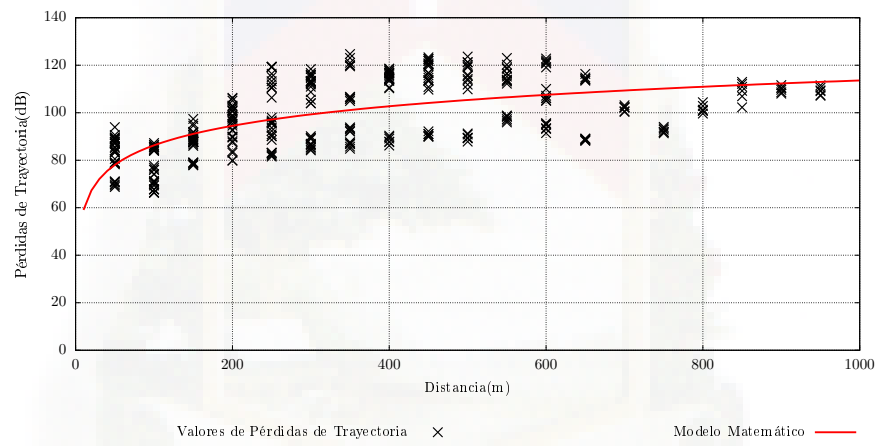
$$P_L(dB) = 31.6563 + 11.8594 \times \log(d) + 11.3941 \quad (5.2)$$

La expresión matemática que modela las pérdidas detrayectoria para el Grupo 3 (R1 - R10 - R11 - R12 - R13 - R14 - R15) se presenta en la Ecuación 5.3. La gráfica de este modelo se muestra en la Figura 5.5c.

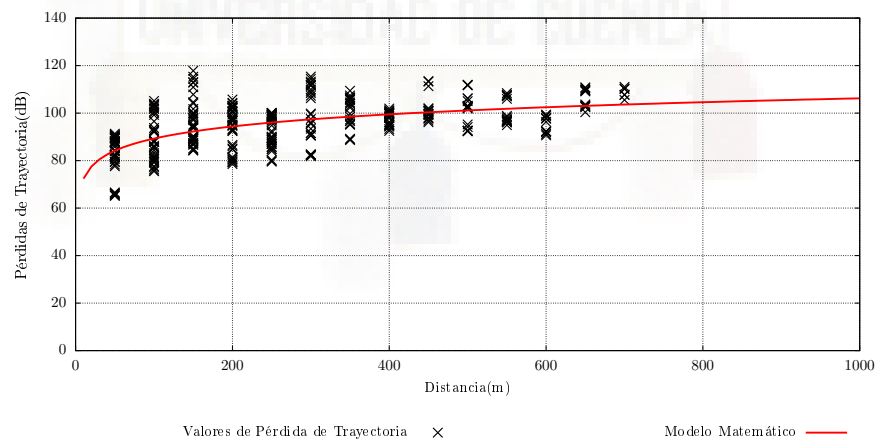
$$P_L(dB) = 55.3968 + 7.3577 \times \log(d) + 8.0628 \quad (5.3)$$



(a) Grupo 1



(b) Grupo 2



(c) Grupo 3

Figura 5.5: Curva característica para modelo de pérdidas de trayectoria.

5.6. Comparación entre modelos de G1 - G2 - G3

Los modelos establecidos para cada grupo se pueden comparar mediante los resultados gráficos para que resulte más intuitiva la comparación. Los modelos de pérdidas de trayectoria de los 3 grupos se contrastan en la Figura 5.6.

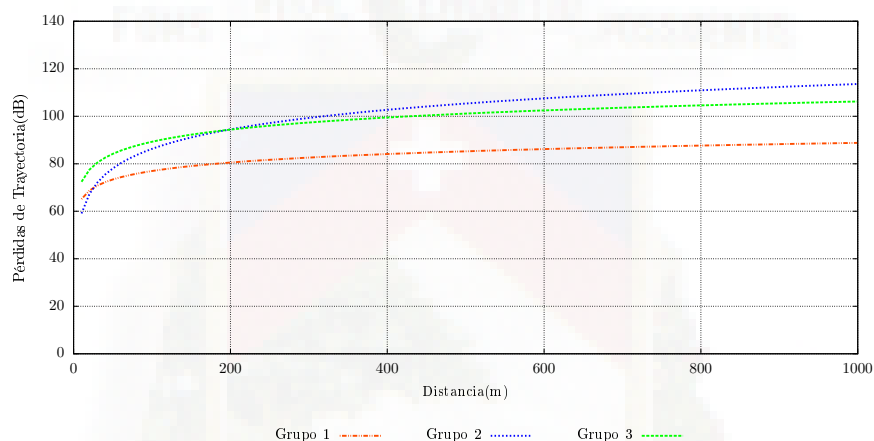


Figura 5.6: Comparación de modelos de pérdida de trayectoria de los tres grupos.

En esta gráfica se pueden comparar los 3 grupos. Se observa que unos presentan mayores pérdidas que otros. Al saber las características del ambiente correspondiente a cada grupo, se puede entender estos resultados. El modelo del Grupo 1 es el que presenta menores pérdidas. Esto concuerda con lo esperado, ya que la topografía del ambiente de este grupo es plana y se tiene [LOS](#), lo cual se ve reflejado con un mejor rendimiento de la transmisión.

Por su parte, el modelo del Grupo 2 describe que en este ambiente es donde se presentan mayores pérdidas. Esto es comprensible ya que en este ambiente se tienen factores como colinas y zonas con vegetación abundante que generan cambios notables en la recepción de la señal. De hecho los radios críticos para este grupo, son R7 y R16, el primero por la vegetación considerable mientras que el segundo se ve afectado por edificaciones que se encuentran en esta trayectoria.

Por su parte, el Grupo 3 se encuentra conformado por muestras que se han tomado en lugares donde el terreno es demasiado irregular, haciendo que en ciertos casos no exista una línea de vista directa hacia el receptor; sin embargo, las pérdidas hasta los 1000 m oscilan en 100 dB que es menor a las pérdidas presentadas en el Grupo 2.

5.7. Comparación de los modelos propuestos con el modelo de LoRaSim

El modelo de pérdidas de trayectoria utilizado en LoRaSim se basa en la Ecuación 5.4. Los valores de los parámetros de la ecuación están definidos por defecto por LoRaSim y se muestran a continuación. En la Figura 5.7 se grafican los modelos definidos en este estudio y también el modelo de LoRaSim.

$$P_L(dB) = P_0 + 10 \times \gamma \times \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X \quad (5.4)$$

Donde:

- P_0 = Potencia recibida en la distancia de referencia en dBm (127.41 dBm).
- d_0 = Distancia de referencia en m (40 m).
- γ = Constante que representa el ambiente (se obtiene de manera empírica) (2.08).

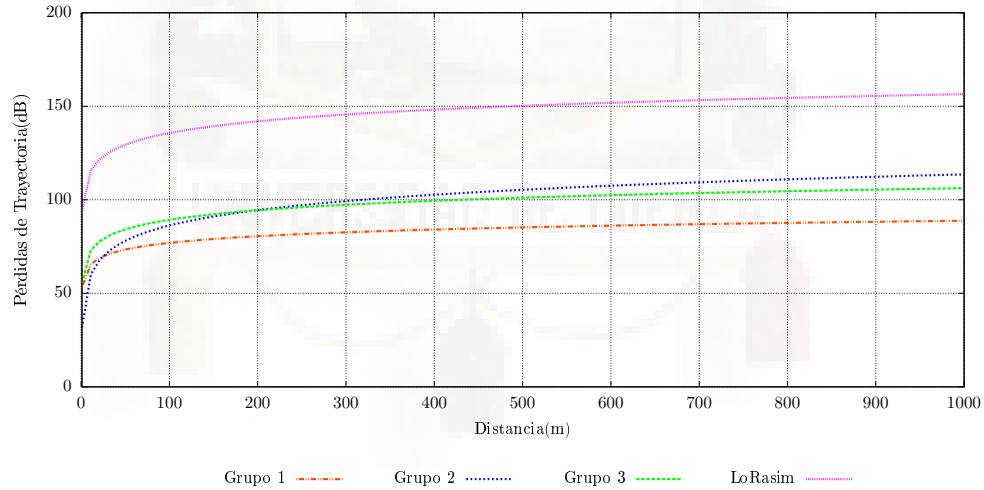


Figura 5.7: Modelos de pérdidas de trayectoria propuestos y el modelo de LoRaSim.

El modelo de LoRaSim se diferencia de los modelos propuestos, presenta valores mayores pérdidas de trayectoria. Lo que indica que si bien puede ser un referente inicial, no es concluyente para un ambiente específico.

5.8. Conclusiones

Determinar el modelo de pérdidas de trayectoria para dispositivos [LoRa](#) en ambientes abiertos proporciona importante información, ya que permite determinar el rango de transmisión y por ende los elementos de red necesarios para una aplicación de [WSN](#).

Las pruebas de Kruskal-Wallis y Dunn realizados para comparar las distribuciones de los ambientes, permitieron definir similitudes y agrupar entornos semejantes estadísticamente al analizar el [RSSI](#) de los 16 radios sujetos a evaluación. Esta agrupación permite definir de manera más efectiva un modelo de pérdidas de trayectoria ajustado para cada ambiente de la granja, en lugar de tener un modelo general que podría no ser el que mejor describa cada zona de la granja.

Con el uso del modelo de pérdidas de trayectoria se puede analizar el comportamiento del [RSSI](#) y el alcance máximo para las diferentes potencias del transmisor.

Se pudo observar que el comportamiento del [RSSI](#) es similar para las diferentes configuraciones de [SF](#) y carga útil. Esto se verifica en las gráficas que se encuentran en el Apéndice [B.1](#).

Los valores del RSSI usados para el ajuste del modelo logarítmico fueron mayores a -110 dBm, como se sugiere en el Apéndice [A](#). Sin embargo, en este escenario, fueron muy pocos los puntos que llegaron a este límite.



Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

Este capítulo se presenta las conclusiones finales del trabajo desarrollado, así como la interpretación de los resultados, inconvenientes que se encontraron en el proceso y finalmente se propone sugerencias para nuevas investigaciones a futuro.

6.1. Conclusiones

En esta investigación se ha determinado que una red [LoRaWAN](#) depende de varios parámetros físicos para mantener un correcto funcionamiento. Consideraciones como topografía y cantidad de vegetación influyen directamente en la recepción de paquetes de datos.

La información y metodologías planteadas en pruebas realizadas tanto en laboratorio como en proyectos de referencia ayudaron a la selección de métodos para realizar la campaña de recolección de datos en campo, en este tipo de ambientes abiertos. La selección de puntos geográficos, la distancia entre radios y puntos de transmisión se analizaron de tal manera que puedan servir como referencia para experimentos en entornos similares.

Con respecto a las mediciones realizadas en base a la señal [RSSI](#) se ha comprobado que la señal decae de forma logarítmica, a medida que separan el dispositivo transmisor del receptor. También se ha demostrado que la cantidad de mensajes recibidos correctamente no se puede considerar como una medida fiable de cobertura, ya que por los factores que se ha mencionado previamente estos resultados pueden variar rápidamente.

Dentro de las configuraciones del equipo sobre características como [SF](#) y carga útil, no se

encontró una superioridad significativa entre una configuración y otra. Respecto a la potencia de transmisión, se demostró en el Apéndice A que para diferentes valores de la misma, la consecuencia sobre el valor del RSSI era proporcional.

Se pudo observar que la altura es un factor importante para la comunicación exitosa, ya que los radios que se encuentran en la parte más baja presentaron mejores índices de RSSI que los que se hallan en la parte más alta de la granja, teniendo en cuenta que la diferencia de alturas entre estas dos partes está entre 12 m y 15 m.

El rango de cobertura no está limitado únicamente por la distancia dentro de la granja, sino más bien por los obstáculos en la línea de vista. Por ejemplo, el Radio 6 que tiene una longitud de 1000 m de distancia presentó un PER por debajo del 10 % en toda su longitud. Este radio tiene la característica de no poseer obstáculos importantes, mientras que en radios como el Radio 8 en donde hay obstáculos relevantes a partir de los 200 m ya se tienen valores de PER por encima del 10 %. En general, con un solo *gateway* se puede cubrir toda la granja, el PER está por debajo del 10 % prácticamente en todos los puntos de la granja. En el Apéndice B.2 se muestra gráficamente el PER de cada radio.

Si bien es cierto, no se hizo un análisis exhaustivo del consumo energético de los equipos ya que este proyecto no plantea una aplicación final, se pudo verificar que con una batería de 6000 mAh el *gateway* podía estar encendido sin problema por aproximadamente las 8 horas que se trabajó diariamente. Mientras que para el caso del equipo transmisor sí se tenía que reemplazar la batería en una ocasión por jornada, pero hay que tener en cuenta que dicha batería también alimentaba al Raspberry Pi.

6.2. Recomendaciones

Durante la elaboración del proyecto se encontraron algunos puntos que pueden optimizarse en proyectos futuros, dado que esta investigación fue de tipo exploratoria en el campo de LoRaWAN para aplicaciones en campo abierto.

- La torre que se encuentra en la granja donde se colocó el dispositivo *gateway* tiene una altura de 24 m, en esta ocasión se colocó el equipo a una altura de 10 m, podría colocarse a mayor altura para conseguir una mejor recepción en zonas que presentan hundimientos o grandes obstáculos.

6.3. Trabajos Futuros

Como continuación de este proyecto de tesis, existen diversas líneas de investigación que son el resultado de cuestiones que han ido surgiendo durante la realización de la misma. A continuación se presentan algunos trabajos futuros que pueden desarrollarse con más profundidad. Entre los posibles trabajos futuros se destacan:

- Este proyecto se realizó con un solo equipo transmisor, sin embargo [LoRaWAN](#) soporta una topología de estrella, por lo que sería interesante utilizar más de un equipo transmisor para agilizar la toma de datos y estudiar la respuesta de la red en estas condiciones.
- En el Apéndice [A](#) se mostró que luego de identificar la frecuencia de resonancia real de la antena propia del kit, ésta no corresponde a la frecuencia de operación del kit Microchip LoRa 900, por lo que podría ser reemplazada por una antena acorde a la necesidad para obtener una mejor respuesta del equipo.
- Se podría realizar un análisis sobre el consumo energético del equipo para aplicaciones finales, ya que es una arista muy relevante y la modulación [LoRa](#) es muy prometedora en este aspecto.
- El nivel más alto de [RSSI](#) se obtuvo en el ambiente definido por los radios del Grupo 1. En este espacio se realiza pastoreo de ganado. Un trabajo a futuro es implementar una solución de monitoreo de ganado mediante una red [LoRaWAN](#). Con un rastreador GPS y un sensor biométrico, se podría monitorear la ubicación y los signos vitales del animal para evitar robos y poder actuar de manera oportuna ante anomalías en la salud.



Anexos



Apéndice A

Reporte Técnico

El siguiente reporte técnico tuvo como objetivo la verificación y caracterización de los valores de [RSSI](#) y [SNR](#) entregados por los equipos de transmisión del kit de desarrollo LoRa 900 el cual será utilizado en la evaluación del comportamiento de la tecnología [LoRa](#) en varios ambientes.



Departamento de Ingeniería
Eléctrica, Electrónica y
Telecomunicaciones

PRUEBAS DE LABORATORIO DEL KIT DE DESARROLLO LORA 900

Juan Peralta(JP), Liseth Carrion(LC), Carlos Alvarez(CA)

10 de septiembre de 2017

Universidad de Cuenca

Departamento de Ingeniería
Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (DEET)

Reporte Técnico Núm. DEET-PWSN-2017-09

Índice

1. Introducción	1
2. Materiales y Equipos	1
2.1. Atenuador de paso manual	1
2.2. Dispositivo PXI	4
2.3. Sensor de potencia USB-5681	4
3. Caracterización de equipos	5
3.1. Atenuación de conductores	5
3.2. Verificación de potencia de transmisión del módulo LoRa	7
3.3. Verificación de modo de transmisión del módulo LoRa	7
3.4. Análisis de cantidad de paquetes perdidos	7
3.5. Verificación de parámetros de antenas	7
4. Metodología	10
4.1. Pruebas en Laboratorio	10
4.2. Pruebas en Campo	11
5. Resultados	13
5.1. Pruebas de Laboratorio	13
5.2. Pruebas de Campo	14
6. Conclusiones y Recomendaciones	22
A. Anexo I: Implementación del Servidor LoRa	24
A.1. Instalación de librería para el descifrado	24
A.2. Código para el descifrado	24
A.3. Código del Servidor	25
B. Anexo II: Código del Transmisor	27

Índice de figuras

1.	Atenuación del cable de 0.5m	5
2.	Atenuación del cable de 0.75m	6
3.	Atenuación del cable de 1m	6
4.	Espectro de transmisión del modulo LoRa	8
5.	Paquetes perdidos según el número de paquetes transmitidos.	8
6.	Impedancia antena omnidireccional	9
7.	Impedancia antena direccional	9
8.	Disposición de los dispositivos LoRa para las pruebas de laboratorio .	10
9.	Ambiente de prueba 1, distancia 115.12 metros	12
10.	Ambiente de prueba 2, distancia 1.797,77 metros	12
11.	Prueba de Laboratorio: RSSI vs Atenuación	13
12.	Prueba de Laboratorio: Paquetes Recibidos vs Atenuación	14
13.	Prueba de Laboratorio: SNR vs Atenuación	14
14.	Ambiente 1: RSSI vs Campo Esperado	15
15.	Ambiente 1: SNR vs Campo Esperado	16
16.	Ambiente 1: PER vs Campo Esperado	16
17.	Ambiente 1: Comparación del RSSI con los resultados obtenidos en laboratorio	17
18.	Ambiente 2 antena omnidireccional: RSSI vs Campo Esperado	18
19.	Ambiente 2 antena omnidireccional: SNR vs Campo Esperado	18
20.	Ambiente 2 antena omnidireccional: PER vs Campo Esperado	19
21.	Ambiente 2 antena omnidireccional: Comparación del RSSI con los resultados obtenidos en laboratorio	19
22.	Ambiente 2 antena direccional: RSSI vs Campo Esperado	20
23.	Ambiente 2 antena direccional: SNR vs Campo Esperado	20
24.	Ambiente 2 antena direccional: PER vs Campo Esperado	21
25.	Ambiente 2 antena direccional: Comparación del RSSI con los resultados obtenidos en laboratorio	21

Índice de tablas

1.	Descripción de atenuador variable.	3
2.	Precisión en función de la atenuación.	3
3.	Descripción de medidor de potencia USB-5681.	4
4.	Potencia de transmisión del módulo LoRa	7



1. Introducción

El trabajo expuesto en este documento, fue realizado con el fin de verificar la fiabilidad de los valores de RSSI y SNR entregados por los equipos de transmisión del kit de desarrollo LoRa 900, el cual se compone de un *gateway* y dos nodos que cuentan con el módulo RN2903 producido por Semtech¹. Este trabajo forma parte del proyecto *Aplicación de tecnologías inalámbricas al sistema de predicción de caudales en la cuenca del río Tomebamba*.

Durante el desarrollo del trabajo, se comprobó varios parámetros técnicos de los equipos a utilizar tales como: atenuación de conductores, potencia y modo de transmisión del módulo LoRa. También se verificó los parámetros de las antenas direccional y omnidireccional.

Se realizó campañas de mediciones dentro de laboratorio y en ambientes exteriores controlados, utilizando atenuadores de potencia fijos y variables para determinar el comportamiento del indicador de nivel de señal recibida medida por el equipo (RSSI) por sus siglas en inglés. Los valores de RSSI obtenidos tanto en las pruebas de laboratorio y en ambientes controlados mostraron una correlación con el nivel de potencia esperado hasta un valor mínimo de -110dBm, los valores de atenuación menores a este no revelaron relación con la medida de RSSI del equipo. Mientras que, la cantidad de paquetes perdidos en cada transmisión se mantuvo constante alrededor del 5 % hasta un valor mínimo el cual variaba dependiendo del factor de ensanchamiento utilizado.

Las transmisiones se realizaron con diferentes valores de carga útil y factor de ensanchamiento, pero los resultados no revelaron una diferencia considerable de estos factores en la medida de RSSI y SNR. Sin embargo, la tasa de pérdida de paquetes si se vio afectada, por lo que es importante aumentar la cantidad de paquetes enviados en valores de nivel de potencia menores a -110dBm.

2. Materiales y Equipos

2.1. Atenuador de paso manual

Los atenuadores de Radio Frecuencia (RF) son dispositivos que se utilizan para reducir la potencia de una señal sin distorsionar su forma original; es decir, son resistencias eléctricas que se alinean con una señal de RF y reducen la intensidad de la señal al convertir cierta cantidad de energía de RF en calor. El nivel de atenuación está definido por el valor de resistencia utilizada. Las señales de RF son irradiadas entre equipo transmisor y receptor; cuando dos conexiones de este sistema se encuentran ubicados demasiado cerca, entonces pueden actuar como un corto dependiendo de la frecuencia

¹Semtech - <https://www.semtech.com/>

de la señal de RF, las resistencias de hilo bobinado no tienen un comportamiento de atenuador sino que actúan como inductores.

2.1.1. Atenuadores Fijos

Estos dispositivos normalmente están integrados por resistencias de carbono, cuyo valor está determinado por el nivel de atenuación necesario. Si la aplicación requiere tener una atenuación muy precisa, entonces es necesario una resistencia de precisión y atenuadores calibrados, estos requerimientos se traducen en un mayor costo del atenuador.

2.1.2. Atenuadores conmutados

Los atenuadores conmutados comprenden dos partes: conmutadores de RF y resistencias fijas. Estos dispositivos permiten obtener varios niveles de atenuación, esto se consigue conmutando entre diferentes resistencias. Según el nivel de precisión y la frecuencia requerida son necesarios diferentes tipos de conmutador, teniendo desde elementos mecánicos hasta digitales, pero también se pueden usar relés de RF y otros métodos de conmutación.

2.1.3. Atenuadores variables

Los atenuadores variables pueden ser digitales o analógicos, cuya principal característica es permitir el ajuste del nivel de atenuación en función de una resistencia variable. Dispositivos de mayor precisión están conformados por elementos integrados que permiten ajustarse a diferentes valores de frecuencia y potencia.

2.1.4. Aplicaciones

Las aplicaciones más comunes de los atenuadores de RF son en procedimientos de pruebas y mediciones, en donde el nivel de la señal necesita ser controlado; ya que puede estar por encima de lo recomendado para el buen funcionamiento del equipo de prueba.

Un atenuador se puede utilizar para proporcionar una adaptación de impedancia precisa, ya que la mayoría de atenuadores fijos ofrecen una impedancia bien definida.

2.1.5. Atenuadores de RF de paso manual 8494B y 8496B

La atenuación puede ser variada mediante una perilla de control ubicada en la parte lateral del equipo, esta atenuación es añadida en la ruta de la señal sobre la pérdida de inserción del atenuador en la posición de 0dB. Estos atenuadores de paso

coaxiales son de 50 ohmios. La atenuación total que proporciona el dispositivo está determinada por la atenuación que se configure de manera individual en cada elemento 8494B y 8496B, los cuales están conectados en cascada. Los conectores de ambas secciones son de Tipo N hembra.

Dispositivo	8494B	8496B
Rango de Frecuencia	dc a 18 GHz	dc a 18 GHz
Atenuación	0 dB a 11 dB	0 dB a 110 dB
Paso	1 dB	10 dB

Tabla 1: Descripción de atenuador variable.

En la Tabla 2 se muestra la precisión que presenta el equipo ante diferentes valores de atenuación requerido.

8494B	8496B	8494B	8496B
Atenuación dB	Atenuación dB	dc a 18 GHz	dc a 18 GHz
1	10	0.3	0.5
2	20	0.3	0.7
3	30	0.4	0.9
4	40	0.4	1.2
5	50	0.5	1.5
6	60	0.5	1.8
7	70	0.6	2.1
8	80	0.6	2.4
9	90	0.6	2.7
10	100	0.6	3.0
11	110	0.7	3.3

Tabla 2: Precisión en función de la atenuación.

2.1.6. Recomendación

No es aconsejable utilizar el equipo para medir señales que excedan 1W de potencia. Además, no se debe aplicar una tensión mayor a 7 Vcd en la entrada o salida del atenuador.

2.2. Dispositivo PXI

PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) es una plataforma de instrumentación modular, diseñada para aplicaciones de alto rendimiento y bajo costo de implementación; con características mecánicas, eléctricas y de software que definen sistemas completos para aplicaciones de pruebas militares, aeroespaciales, monitoreo de máquinas, automotrices y pruebas industriales. Proporciona energía, enfriamiento y un bus de comunicación para soportar múltiples módulos de instrumentación dentro de un mismo chasis. National Instruments desarrolló y anunció la especificación PXI en 1997 y la publicó en 1998, PXI es un estándar abierto en la industria gobernado por PXI Systems Alliance (PXISA).

2.3. Sensor de potencia USB-5681

El dispositivo utilizado para medir la potencia de la señal de RF radiada por el transmisor es un USB-5681 de National Instruments, el cual permite determinar el valor de potencia RMS; este elemento cuenta con conectividad USB que permite alimentarlo desde el computador. El dispositivo consume 150 mA de la conexión USB, lo que lo convierte en ideal para aplicaciones móviles, resulta muy conveniente cuando se requiere obtener medidas promedio con un gran nivel de precisión.

La activación del hardware del USB-5681, puede ser por una fuente de activación externa o por su propio software, la elección se da en función de la fuente de señal. Para visualizar el valor medido se hace uso del propio software NI-568x Soft Front Panel en el cual se muestra de manera numérica y gráfica.

Parámetros generales	
Tipo de equipo	Medidor de potencia portátil
Medición de Potencia	Potencia media
Canales	Canal único
Frecuencia	10 MHz a 18 GHz
Rango de potencia	-40 a 20 dBm
Impedancia	100 k Ω
Resolución de medición	0.01 dB
Rango de retardo	-5 ms a 10 s

Tabla 3: Descripción de medidor de potencia USB-5681.

3. Caracterización de equipos

3.1. Atenuación de conductores

El proceso de caracterización de los atenuadores se realizó en el equipo PXI expuesto en la Sección 2.2.

El valor de atenuación de los conductores fue determinado mediante una transmisión con -10dBm de potencia, la diferencia de potencia medida por el modulo receptor se considera como la atenuación producida por los conductores.

Las gráficas de potencia obtenidas para diferentes longitudes de cable se muestran en las Figuras 1, 2 y 3.

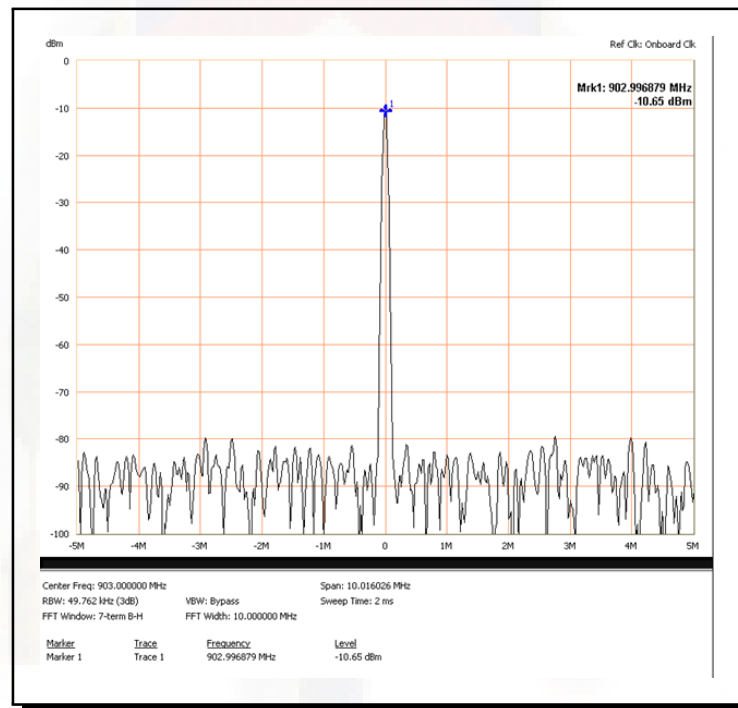


Figura 1: Atenuación del cable de 0.5m

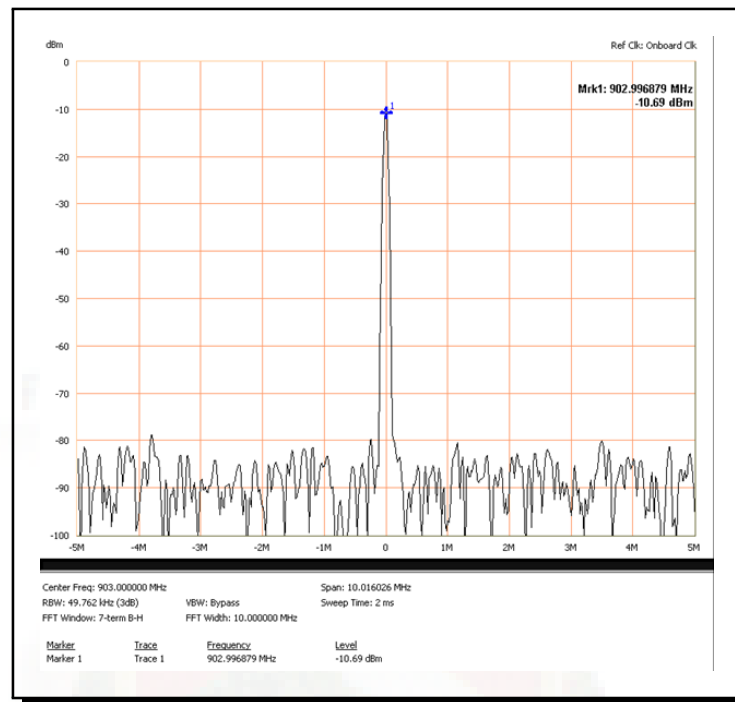


Figura 2: Atenuación del cable de 0.75m

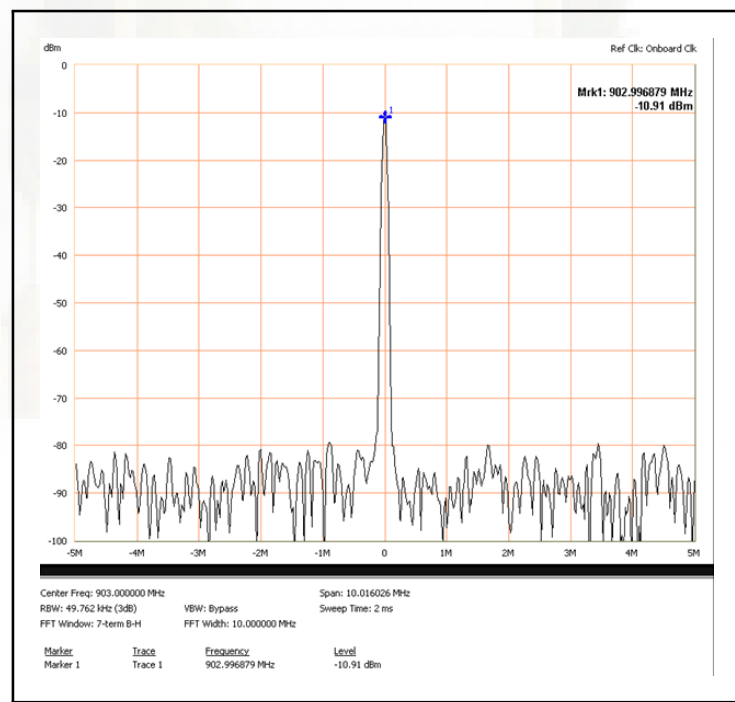


Figura 3: Atenuación del cable de 1m

3.2. Verificación de potencia de transmisión del módulo LoRa

Las pruebas para determinar la potencia de transmisión del módulo LoRa fueron realizadas con las diferentes configuraciones de potencia (pwridx) expuestas en [1].

El dispositivo de medición de potencia utilizado fue el mostrado en la Sección 2.3, los resultados de las pruebas y su comparación con lo especificado por el fabricante se muestra en la Tabla 4.

Configuración (pwridx)	Potencia Medida (db)	Potencia Fabricante (db)
5	18.43	18.5
7	15.74	15
8	13.91	14
9	12.05	13
10	10.14	10

Tabla 4: Potencia de transmisión del módulo LoRa

3.3. Verificación de modo de transmisión del módulo LoRa

Se utilizó el equipo PXI expuesto en la Sección 2.2 en modo de captura de máximos para obtener el espectro completo de la transmisión, al ser el dispositivo utilizado de Clase A[2], la transmisión se realiza de manera no continua, un paquete a la vez. Como se puede observar en la Figura 4, se utilizan 7 portadoras que se encuentran alrededor de los 903Mhz.

3.4. Análisis de cantidad de paquetes perdidos

Para las pruebas de laboratorio y de campo se debe enviar cierta cantidad de paquetes, la finalidad de esta prueba es verificar la fiabilidad del valor de pérdida de paquetes con respecto a la cantidad de paquetes transmitidos. En la Figura 5 se puede observar varias transmisiones con diferente número de paquetes en el cual se ha variado el nivel de atenuación, los resultados obtenidos muestran que en las transmisiones entre 300 y 1000 paquetes la cantidad de paquetes perdidos es un valor estable.

3.5. Verificación de parámetros de antenas

Se realizó una prueba de impedancia a cada antena que se usarán en el campo para la verificación de la frecuencia de resonancia de las mismas.

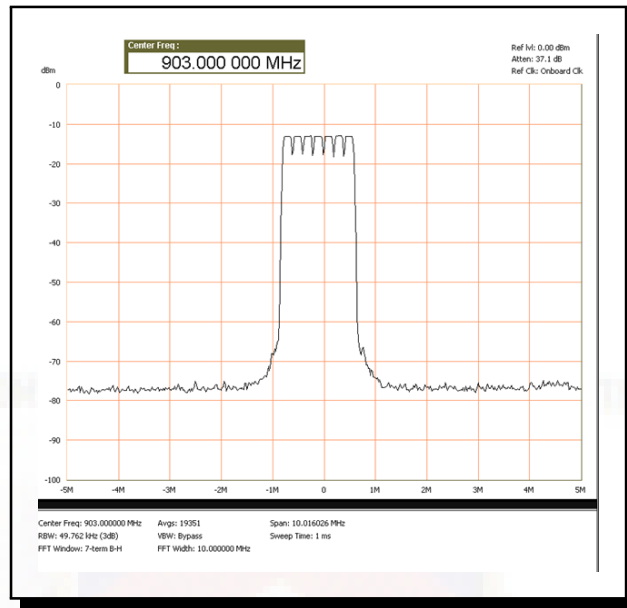


Figura 4: Espectro de transmisión del módulo LoRa

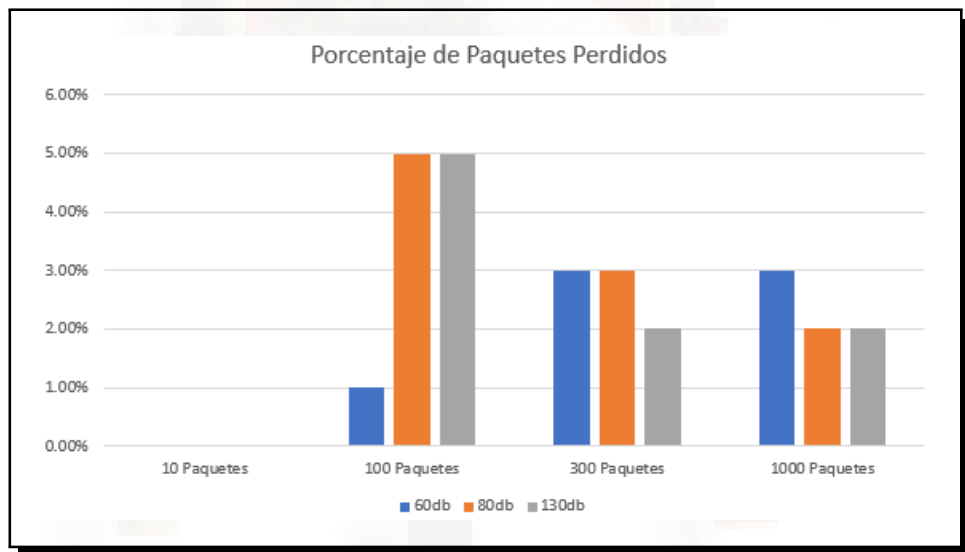


Figura 5: Paquetes perdidos según el número de paquetes transmitidos.

El gráfico obtenido para la antena omnidireccional incluida en el kit de desarrollo LoRa 900 se muestra en la Figura 6.

De manera similar, se realizó la prueba hacia una antena direccional HG908p-SM de la empresa L-COM, los resultados obtenidos se muestran en la Figura 7.

La sección del espectro utilizada por el módulo LoRa 900 se encuentran delimitadas por las barras rojas verticales. Se observó que ninguna de las antenas analizadas fueron

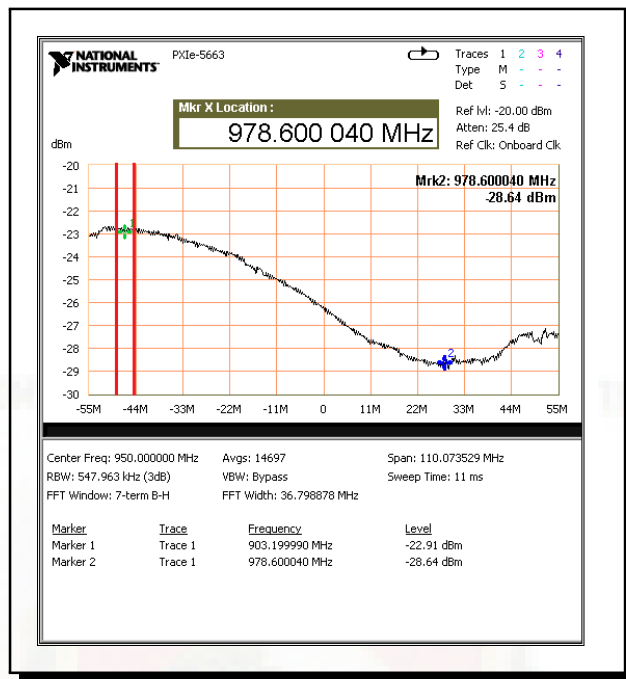


Figura 6: Impedancia antenna omnidireccional

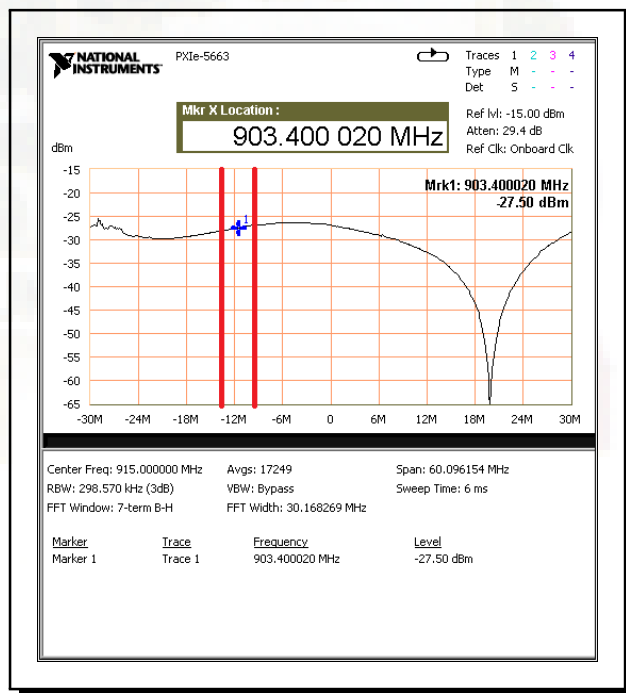


Figura 7: Impedancia antenna direccional

construidas con una frecuencia de resonancia acorde a la frecuencia de transmisión

utilizada. Al no tener una antena de referencia, no se pudo validar la ganancia de las mismas.

4. Metodología

4.1. Pruebas en Laboratorio

Se realizaron pruebas de transmisión en un ambiente controlado con el objetivo de verificar la relación existente entre la medición de RSSI entregada por el equipo LoRa 900 y la atenuación introducida.

Estos resultados serán útiles para comprobar si este valor puede ser utilizado para la construcción de un modelo de propagación para varios ambientes.

4.1.1. Diagrama de bloques de la prueba

La disposición de los equipos utilizados se muestra en la Figura 8, los módulos se encuentran acoplados a través de cables de transmisión de RF caracterizados en la Sección 3.1, en el centro se colocó un atenuador variable para simular las pérdidas de espacio libre existente entre los equipos de transmisión.

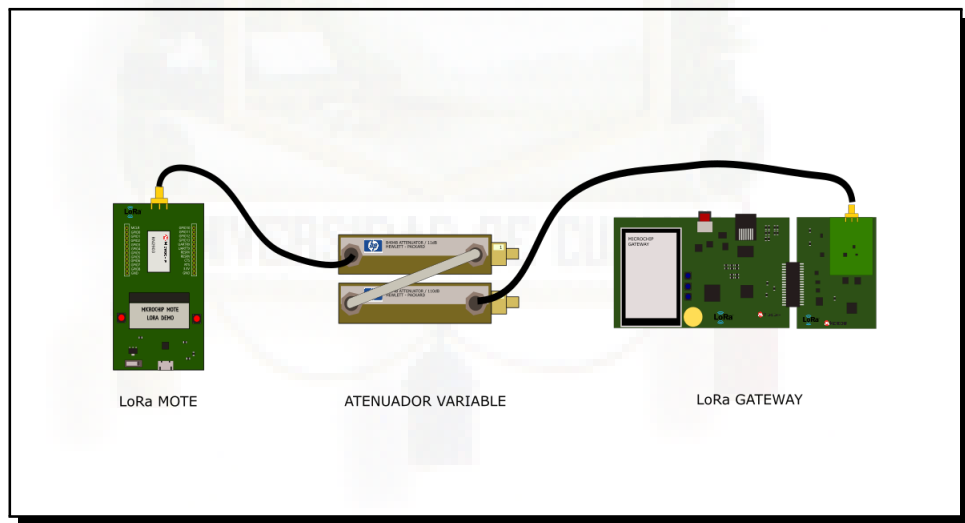


Figura 8: Disposición de los dispositivos LoRa para las pruebas de laboratorio

4.1.2. Configuraciones de los equipos

La configuración utilizada para la transmisión controlada en laboratorio fue:

- Dirección del dispositivo de red : 001AD314
- Clave de Aplicación : 3C8F262739BFE3B7BC0826991AD0504D
- Clave de Red : 2B7E151628AED2A6ABF7158809CF4F3C
- Potencia de transmisión : 18.5 dBm (pwridx 5)
- Data Rate : 980 bit/sec (DR 0) y 5470 bit/sec (DR 7)

4.1.3. Procedimiento de adquisición de datos

La prueba de transmisión consiste en el envío de 300 paquetes, cada paquete recibido entrega un valor de RSSI y SNR, dicha información es almacenada en el servidor para su posterior análisis.

Las iteraciones se iniciaron con una atenuación entre los equipos de 50dB, el cual fue el valor obtenido en pruebas de transmisión por aire con una separación de 1 metro. Para obtener una resolución aceptable se realizaron pruebas hasta los 170dB de atenuación con un paso entre cada iteración de 5dB.

4.2. Pruebas en Campo

Se realizaron pruebas de transmisión en dos tipos de ambientes, el primero ubicado dentro de la Universidad de Cuenca como se observa en la Figura 9, sin línea de vista entre el transmisor y el receptor de LoRaWAN. El segundo ubicado entre el Colegio de Ingenieros Civiles del Azuay (CICA) y el mirador de Turi como indica la Figura 10, sin obstáculos entre los equipos de transmisión.

El procedimiento de configuración y adquisición de equipos utilizado es similar a lo expuesto en las Secciones 4.1.2 y 4.1.3, tomando como atenuación inicial las pérdidas por espacio libre debido a la distancia entre los equipos de transmisión.

Adicionalmente se realizaron pruebas de transmisión con variaciones de tamaño de trama y factor de ensanchamiento.

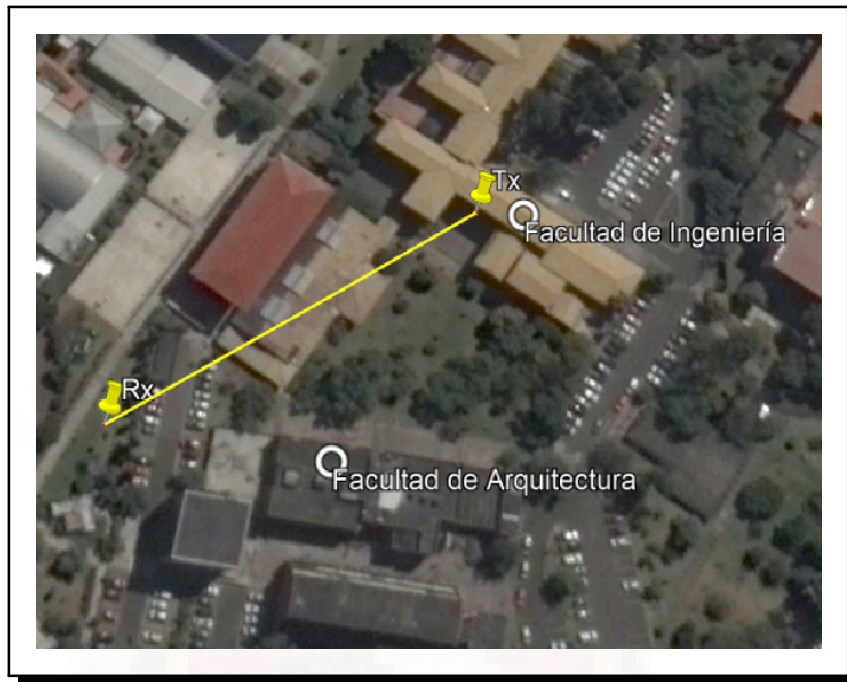


Figura 9: Ambiente de prueba 1, distancia 115.12 metros

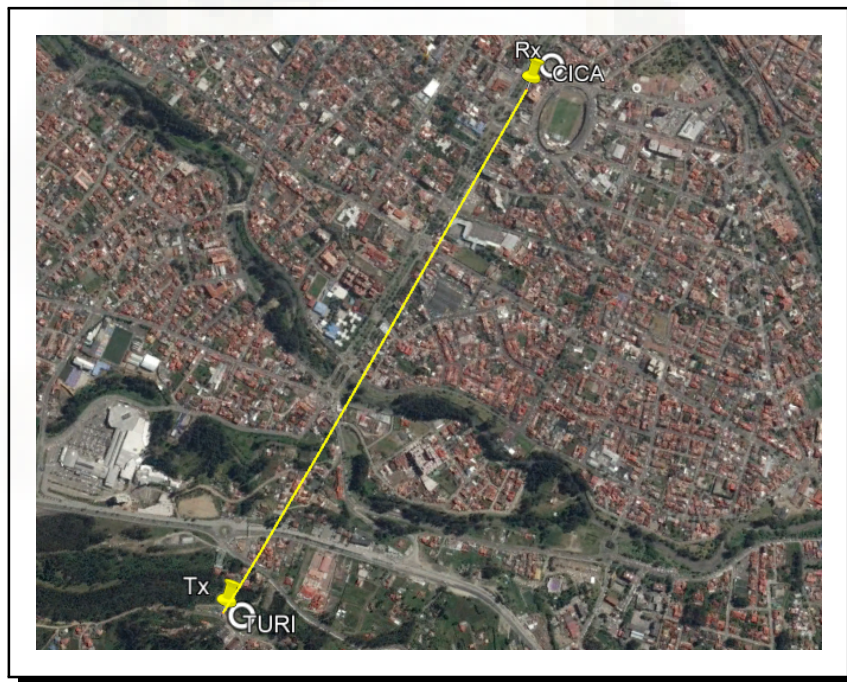


Figura 10: Ambiente de prueba 2, distancia 1.797,77 metros

5. Resultados

5.1. Pruebas de Laboratorio

Luego del análisis de los datos, se pudo observar que el RSSI se comporta de manera lineal con respecto a la atenuación introducida como se observa en la Figura 11, sin embargo se observó que para valores de RSSI menores a -110dBm los valores entregados por el equipo no son confiables ya que la medida no corresponde a la atenuación introducida.

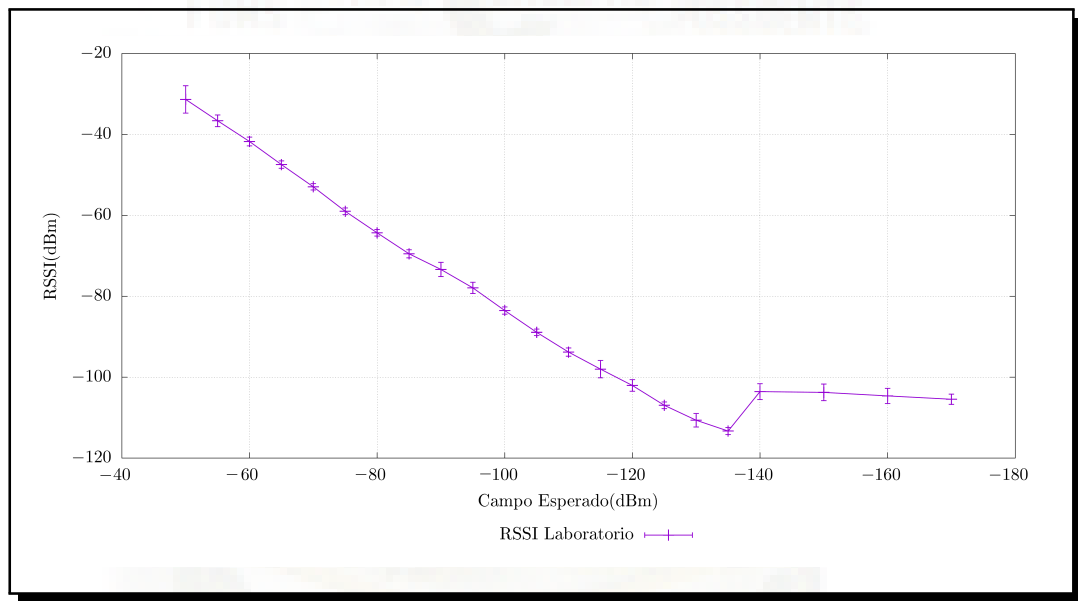


Figura 11: Prueba de Laboratorio: RSSI vs Atenuación

Por otro lado, el porcentaje de paquetes perdidos se mantuvo estable con valores entre el 2 % y 6 % como se muestra en la Figura 12. La relación señal a ruido se mantuvo con una variación mínima hasta un nivel de potencia de -110dBm donde el valor empieza a decaer, tal como se muestra en la Figura 13.

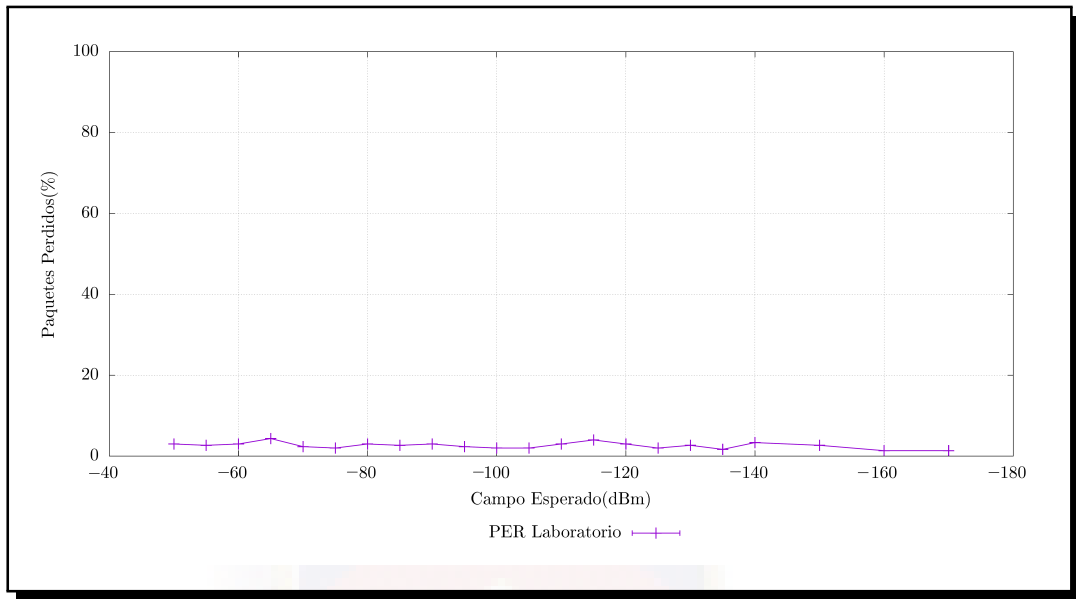


Figura 12: Prueba de Laboratorio: Paquetes Recibidos vs Atenuación

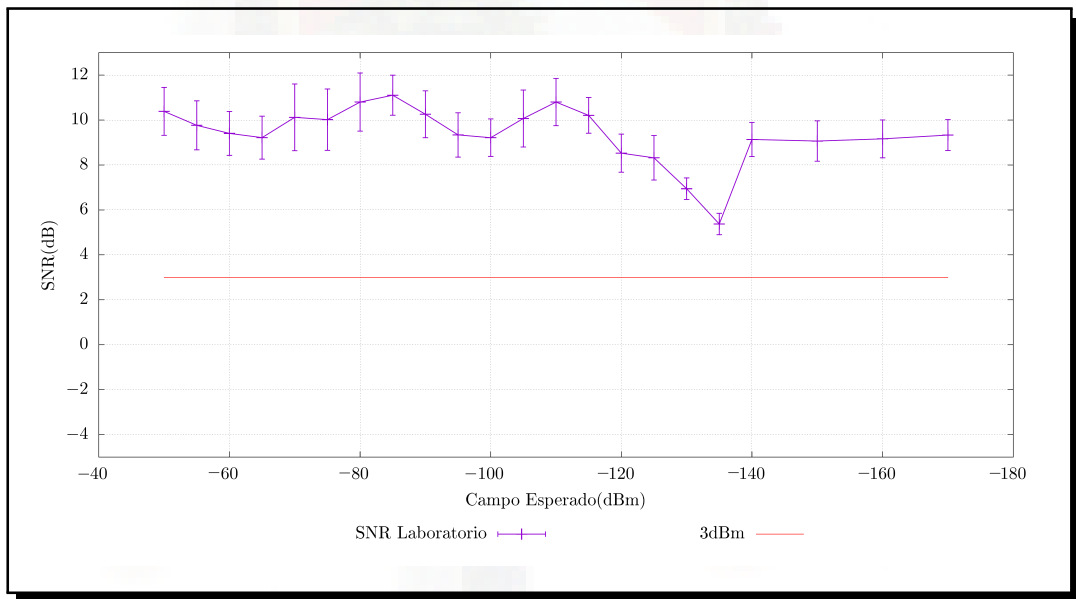


Figura 13: Prueba de Laboratorio: SNR vs Atenuación

5.2. Pruebas de Campo

5.2.1. Ambiente 1: Universidad de Cuenca

Las pruebas realizadas dentro de la Universidad de Cuenca mostraron que los valores de RSSI no cuentan con el comportamiento lineal obtenido en las pruebas de

laboratorio, esto se puede evidenciar en las Figuras 14 y 17.

Por otro lado se pudo observar dos tendencias en los valores de paquetes perdidos que corresponden al *spreading factor* utilizado, como se observa en la Figura 16.

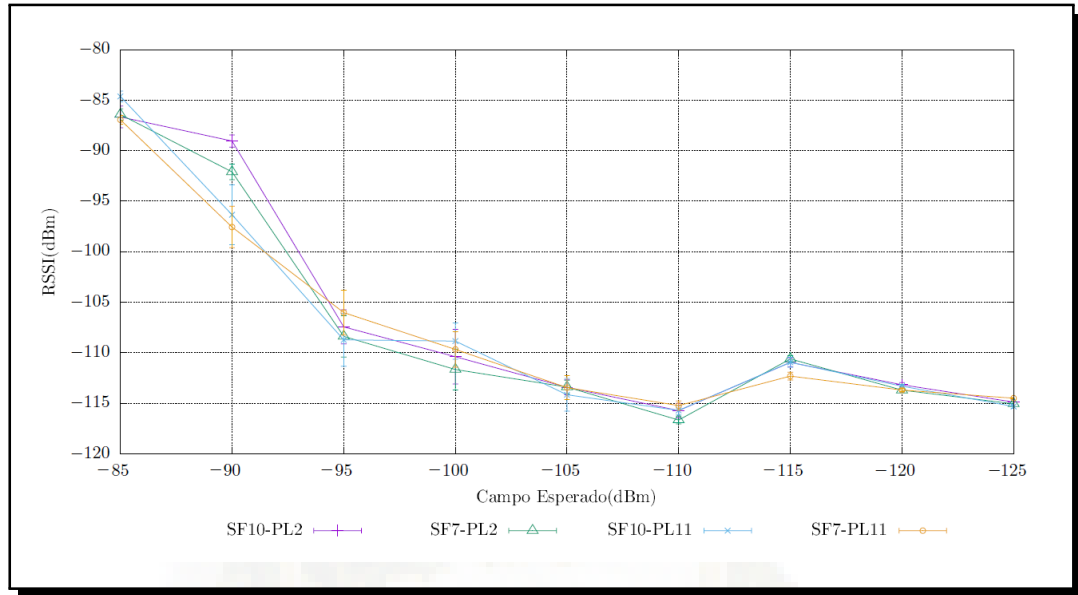


Figura 14: Ambiente 1: RSSI vs Campo Esperado

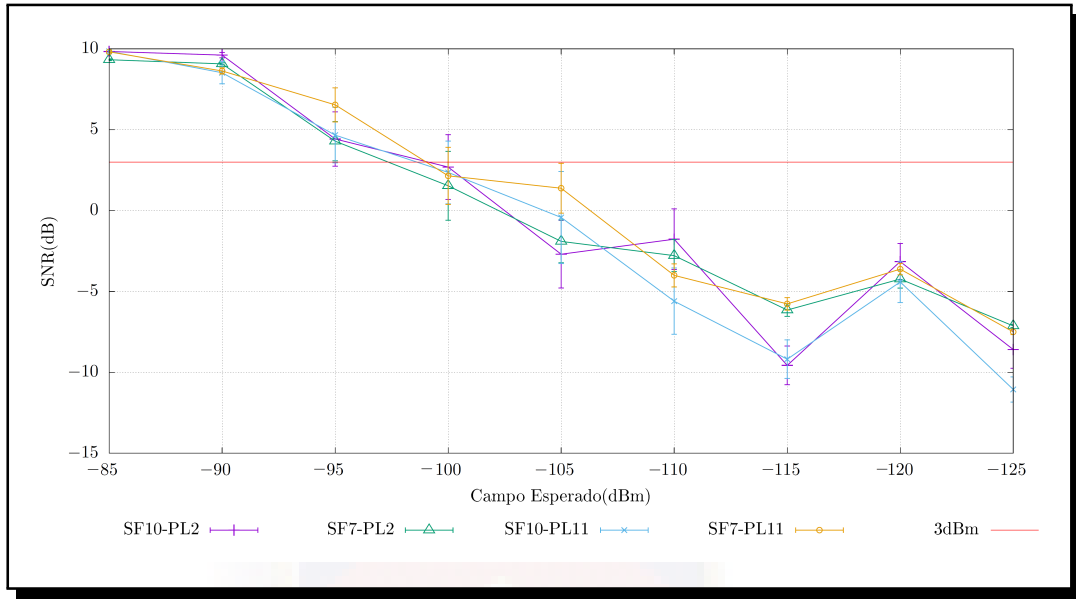


Figura 15: Ambiente 1: SNR vs Campo Esperado

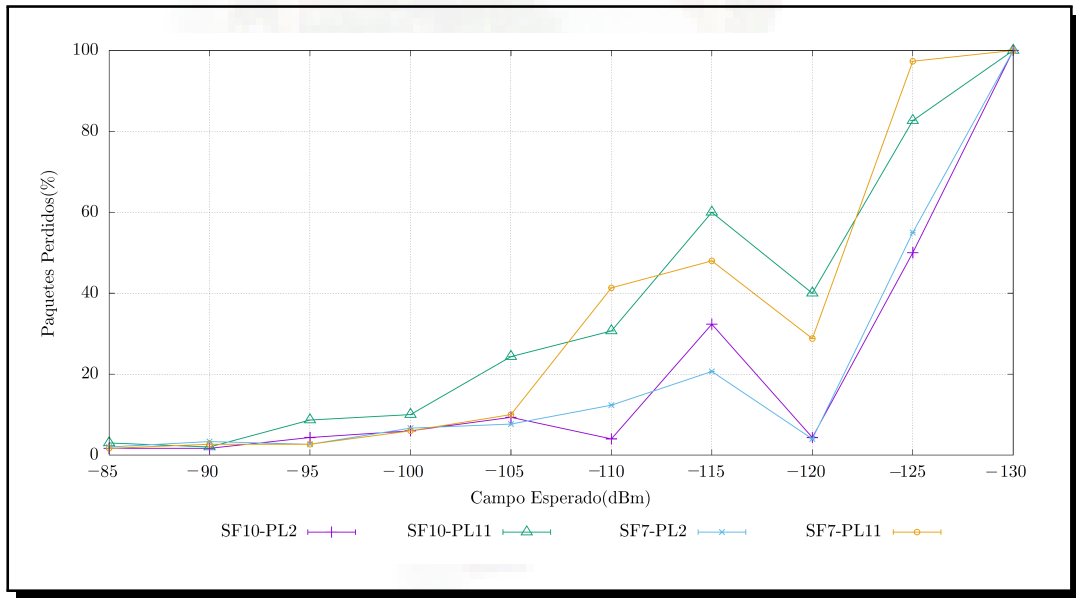


Figura 16: Ambiente 1: PER vs Campo Esperado

5.2.2. Ambiente 2: Transmisión con línea de vista

Los resultados de RSSI medidos en este ambiente con los dos tipos de antena expuestas en la Sección 3.5 corresponden a los valores de campo esperados y a los resultados obtenidos en el laboratorio. Los resultados obtenidos se presentan en las

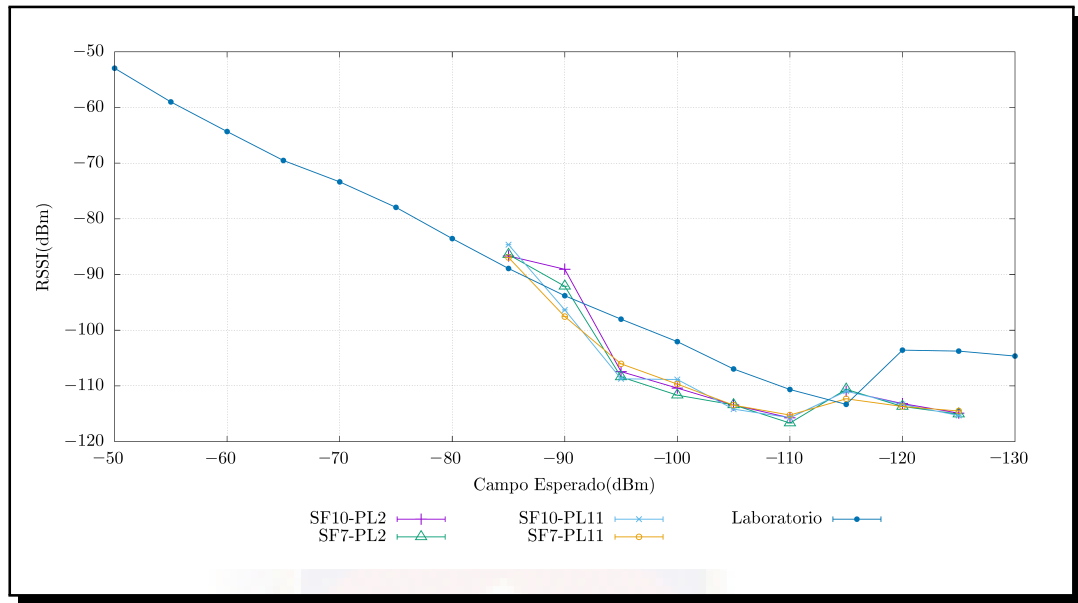


Figura 17: Ambiente 1: Comparación del RSSI con los resultados obtenidos en laboratorio

Figuras 18,21,22 y 25.

De la misma forma que el ambiente 1, los valores de paquetes perdidos tienen relación con el factor de ensanchamiento utilizado, esto se puede evidenciar en la Figuras 20 y 24, donde el porcentaje de paquetes perdidos es menor al 10 % en valores de RSSI mayores a -110dBm.

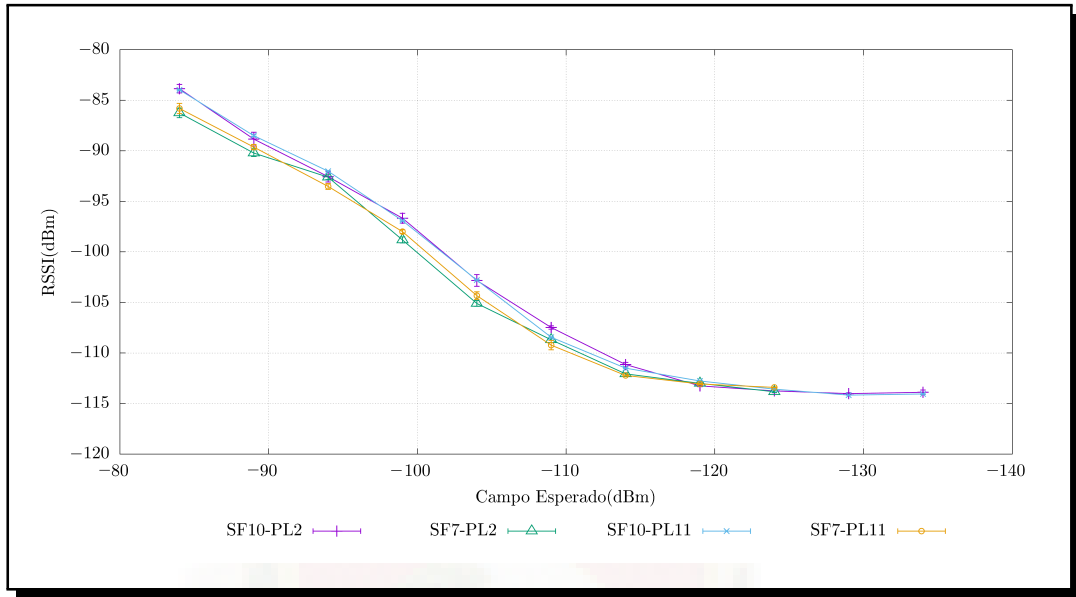


Figura 18: Ambiente 2 antena omnidireccional: RSSI vs Campo Esperado

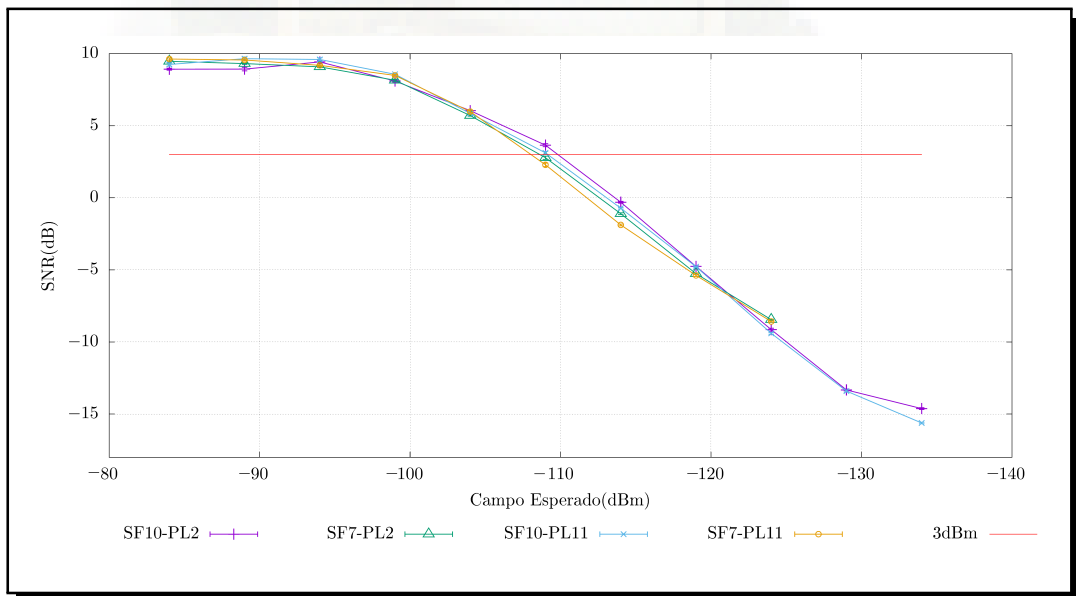


Figura 19: Ambiente 2 antena omnidireccional: SNR vs Campo Esperado

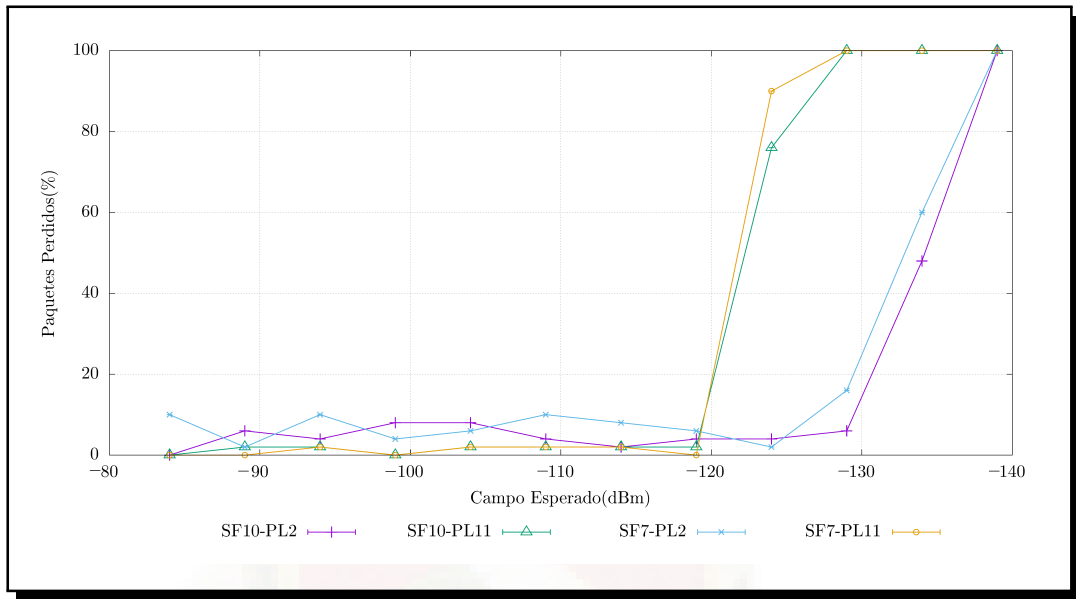


Figura 20: Ambiente 2 antena omnidireccional: PER vs Campo Esperado

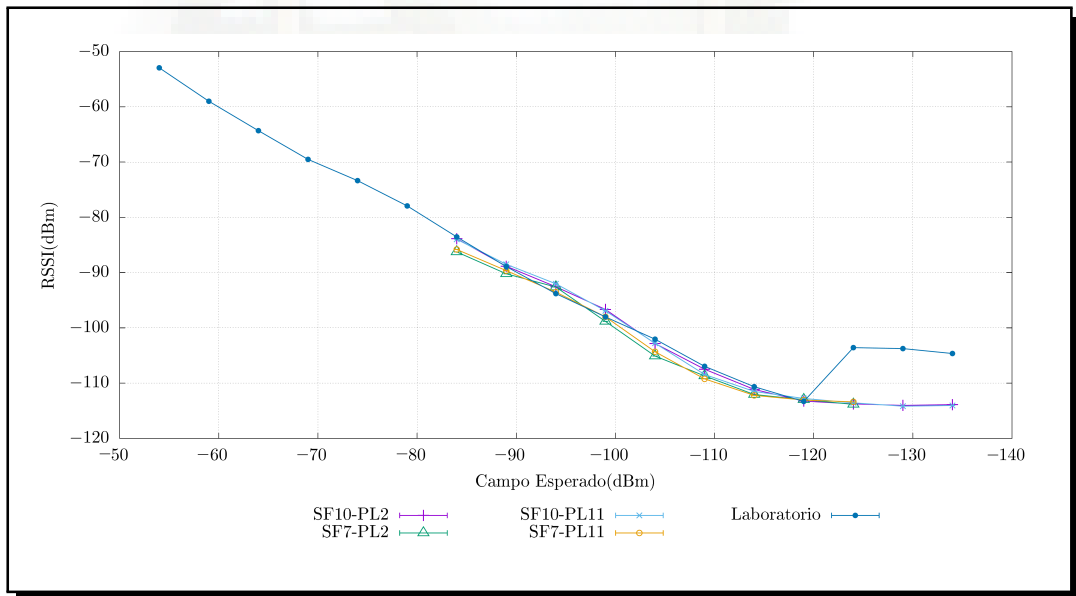


Figura 21: Ambiente 2 antena omnidireccional: Comparación del RSSI con los resultados obtenidos en laboratorio

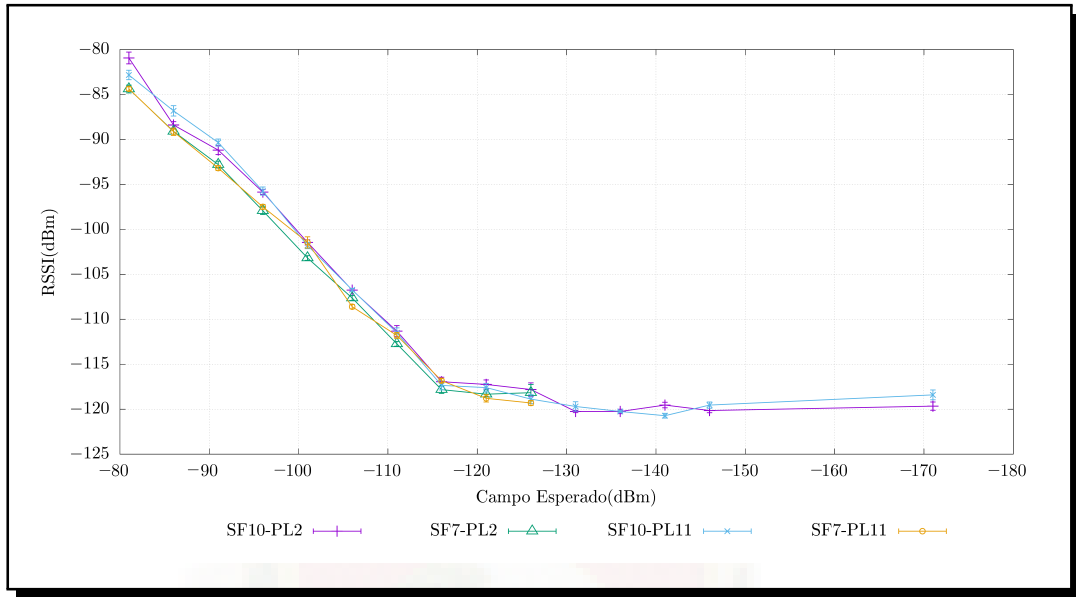


Figura 22: Ambiente 2 antena direccional: RSSI vs Campo Esperado

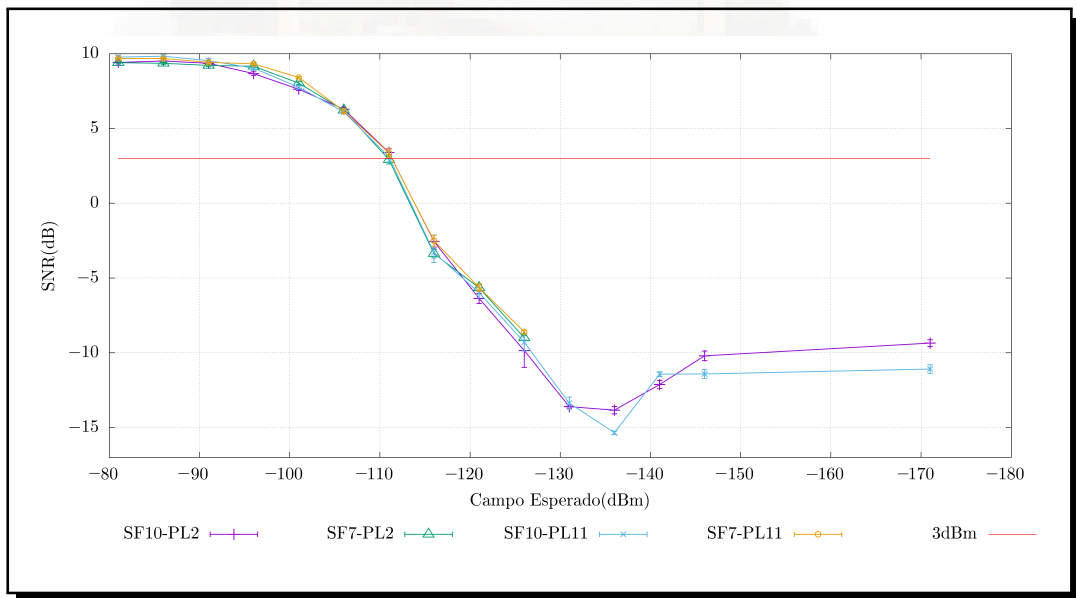


Figura 23: Ambiente 2 antena direccional: SNR vs Campo Esperado

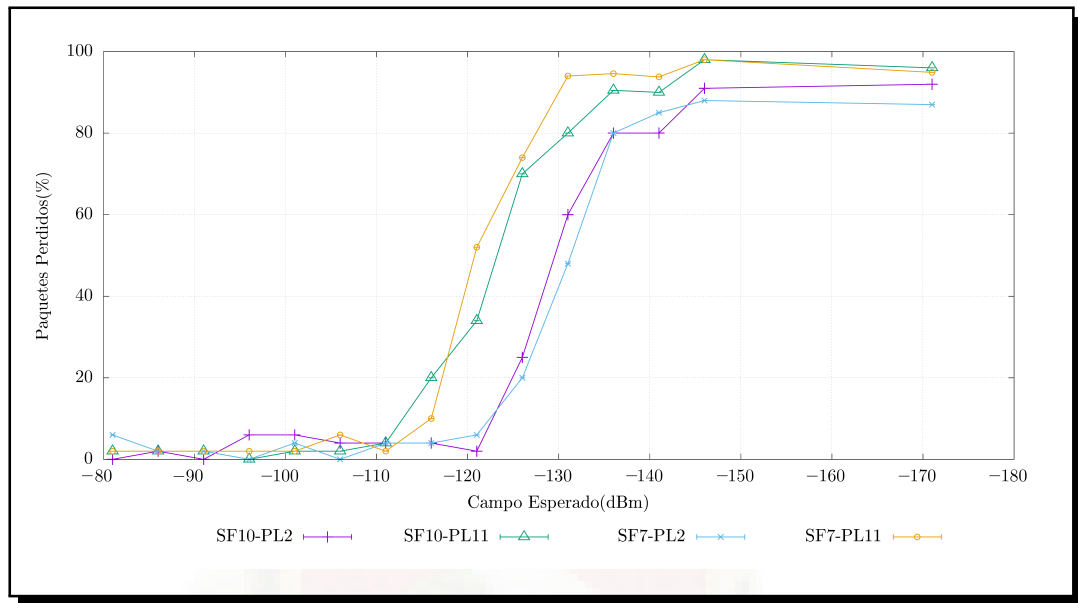


Figura 24: Ambiente 2 antena direccional: PER vs Campo Esperado

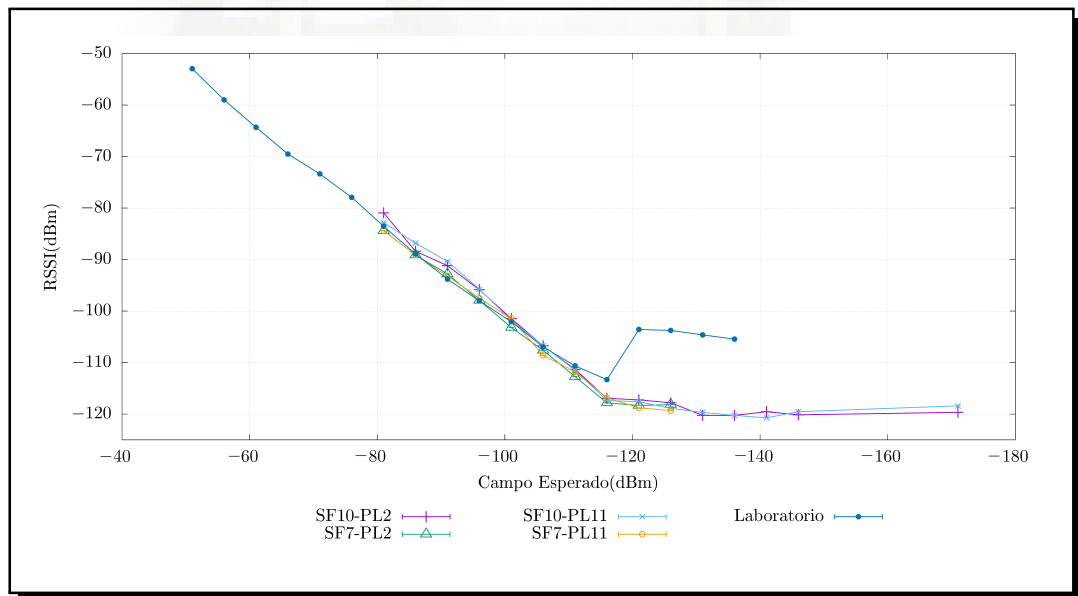


Figura 25: Ambiente 2 antena direccional: Comparación del RSSI con los resultados obtenidos en laboratorio

6. Conclusiones y Recomendaciones

Los resultados obtenidos muestran que los valores de RSSI entregados por el equipo corresponden a los valores de atenuación introducidas en las diferentes pruebas realizadas, este comportamiento se mantiene estable hasta los -110dBm, para valores menores a dicho umbral el equipo entrega valores que no se pueden considerar fiables para su uso en modelos de pérdida de trayectoria.

En las pruebas realizadas dentro de la Universidad de Cuenca existen valores de RSSI que no tienen relación con el campo esperado debido al tráfico de personas cerca del equipo de transmisión, por lo que se obtuvo una diferencia entre 5 y 10 dB de atenuación adicional.

El porcentaje de paquetes perdidos se mantiene estable en aproximadamente el 6 %, este valor empieza a aumentar para cantidades menores de RSSI de -100dBm con factor de ensanchamiento de 7 y valores menores de RSSI de -110dBm con factor de ensanchamiento de 10.

Por otro lado, los resultados no arrojaron diferencias importantes entre el uso de la antena omnidireccional incluida en el paquete de desarrollo LoRa 900 y la antena direccional HG908p-SM, esto se debe a que la frecuencia de resonancia de los dos tipos de antena se encuentra alejada de la frecuencia de transmisión del módulo LoRa.

Se recomienda utilizar un valor de 0 dBi para cualquier cálculo matemático al utilizar el equipo de desarrollo con estas antenas, además el diseño y construcción de antenas con frecuencia de resonancia de 903MHz para la ejecución de proyectos de investigación futuros con dicho módulo.

Referencias

- [1] MICROCHIP, *RN2903 LoRa Technology Module Command Reference User's Guide*, 2015.
- [2] MICROCHIP, *LoRaWAN Specification*, 2015.
- [3] AGILENT TECHNOLOGIES, *Agilent Technologies 8494A/B, 8495A/B, and 8496A/B Attenuators*, 2002.
- [4] AGILENT TECHNOLOGIES, *Agilent 8491A/B, 8493A/B/C, 11581A, 11582A and 11583C*, 2010.
- [5] NATIONAL INSTRUMENTS, *USB-5681 Specifications*, 2010.
- [6] NATIONAL INSTRUMENTS, *Tutorial, ¿Qué es PXI?*, 2017.

- [7] NATIONAL INSTRUMENTS, *Introducción a la Arquitectura PXI*, 2016.
- [8] NATIONAL INSTRUMENTS, *Preguntas Frecuentes sobre PXI Express*, 2012.
- [9] NATIONAL INSTRUMENTS, *Producto, ¿Qué es PXI?*, 2017.



A. Anexo I: Implementación del Servidor LoRa

A.1. Instalación de librería para el descifrado

Para el descifrado de los datos recibidos se utilizó la librería lora-package la cual se encuentra implementada en el lenguaje JavaScript. Los comandos para la instalación de los paquetes necesarios en un sistema operativo basado en Linux son los siguientes.

- sudo apt-get install npm
- npm install -g crypto-js
- npm install -g node-aes-cmac
- npm install -g lora-packet
- npm install -g lora-decrypt

A.2. Código para el descifrado

El siguiente código debe copiarse a la ruta de instalación de la librería lora-packet con el nombre lora-decrypt.

```
1  #!/usr/bin/env node
2
3  "use strict";
4
5  /**
6   * LoRa Decrypt Code
7   * Ucuencia
8   */
9  var lora_packet = require('../lib/index.js');
10 var cmdlineArgs = process.argv;
11
12 //Start
13 var inputData = new Buffer(cmdlineArgs[2], 'base64');
14 var packet = lora_packet.fromWire(inputData);
15 var AppSKey_hex = "3c8f262739bfe3b7bc0826991ad0504d";
16 var NwkSkey_hex = "2b7e151628aed2a6abf7158809cf4f3c";
17 var decrypted = lora_packet.decrypt(packet, new Buffer(AppSKey_hex,
18   'hex'), new Buffer(NwkSkey_hex, 'hex'));
19 //Output
20 console.log (decrypted)
```

Listing 1: Código de descifrado lora-decrypt

A.3. Código del Servidor

La implementación del servidor se la realizó en el lenguaje de programación Python, el código recibe los datos procedentes del Gateway por la interfaz Ethernet, dichos datos se guardan en un archivo .csv, el nombre de dicho archivo es ingresado al momento de iniciar el código.

```
1 #Este Scrip crea un archivo .csv con las transmisiones procedentes
  del gateway
2 #Creado por : Juan Francisco Peralta Santos
3 #juan.peraltas@ucuenca.ec
4
5 import socket
6 import sys
7 import subprocess
8 import statistics
9 import csv
10 import atexit
11
12 #-----Configuracion de Socket UDP-----
13 port = 1700
14 s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_DGRAM)
15 s.bind(("", port))
16 print "-----"
17 print "-----UNIVERSIDAD DE CUENCA-----"
18 print "-----"
19 print "Escuchando el puerto:", port
20
21
22 #-----Funciones-----
23 def cut_comas(indexD, inicio):
24     index = indexD + 7
25     ban = 0
26     while index <= len(data) and ban == 0:
27         if data[index] == ',':
28             return data[indexD + inicio:index + 1]
29             ban = 1
30         else:
31             index = index + 1
32
33 #-----Comentarios Para el archivo csv-----
34 arch=raw_input("Nombre del Archivo :")
35 pot=raw_input("Potencia de Transmicion :")
36 altura=raw_input("Altura :")
37 payl=raw_input("Payload :")
38
39 #-----Crear csv y escribir titulos de columna-----
40 f = open(arch+'.csv', 'wt')
41 writer = csv.writer(f)
42 writer.writerow(('Potencia', pot, 'Altura', altura, 'Payload', payl))
43 writer = csv.writer(f)
44 writer.writerow((' ', ' ', ' ', ' '))
```



```

45 writer = csv.writer(f)
46 writer.writerow(('Paquete', 'Tmst', 'Frecuencia', 'Canal', 'RFCanal', '
    DatTrans', 'Tamano', 'RSSI', 'SNR', 'Encode DATA', 'DATA'))
47 print "Esperando datos ....."
48
49 #----- Recibir datos del socket,desencriptar y guardar en csv
    -----
50 try:
51     con=0 #Contador de numero de paquetes recibidos
52     while 1:
53         data, addr = s.recvfrom(1024)
54         longitud = len(data)
55         if longitud >= 150:
56             con = con + 1
57             long = len(data)
58             tmstp = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('tmst')]
59             freqp = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('freq')]
60             chanp = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('chan')]
61             rfchp = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('rfch')]
62             rssip = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('rssi')]
63             datap = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('data')]
64             datrp = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('datr')]
65             sizep = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('size')]
66             lsnrp = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('lsnr')]
67             tmst = cut_comas(tmstp[0],4)
68             datos=cut_comas(datap[0],6)
69             datr = cut_comas(datr[0],6)
70             rssi=cut_comas(rssip[0],4)
71             freq=cut_comas(freqp[0],4)
72             size = cut_comas(sizep[0],4)
73             chan = cut_comas(chanp[0],4)
74             rfch = cut_comas(rfchp[0],4)
75             snr=cut_comas(lsnrp[0],4)
76             datosdec = subprocess.check_output('nodejs /usr/local/
                lib/node_modules/lora-packet/bin/lora-decrypt ' +
                datos, shell=True).decode('utf-8')
77             writer = csv.writer(f)
78             writer.writerow((con,tmst[2:-2],freq[2:9],chan[2],rfch
                [2],datr[1:-2],size[2:-2],rssi[2:-2],snr[2:-2],datos
                [1:-1],datosdec[8:-2]))
79             print "PAQUETE:"+str(con)+" == "+" Freq:"+freq[2:9]+"
                RSSI:"+rssi[2:-2]+" SNR:"+snr[2:-2]+" Size:"+size
                [2:-2]+" Data:"+datosdec[8:-2]

```

```

80 #----- Cerrar socket y archivo csv -----
81 finally:
82     print "Finalizando....."
83     s.close()
84     f.close()

```

Listing 2: Código del Servidor

B. Anexo II: Código del Transmisor

El código para la transmisión de datos se la realizo en el lenguaje de programación Python, este código envía las configuraciones y peticiones al nodo por medio de una interfaz serial USB.

```

1  import serial
2  import time
3  import sys
4
5  # import RPi.GPIO as GPIO
6  LedPin = 11  # pin11
7
8  BAUD_RATE = 57600
9
10
11 class LoRaSerial(object):
12     def __init__(self, _serial_port):
13         '''
14             configures serial connection
15         '''
16         self._ser = serial.Serial(_serial_port, BAUD_RATE)
17
18         # timeout block read
19         self._ser.timeout = 8
20
21         # disable software flow control
22         self._ser.xonxoff = False
23
24         # disable hardware (RTS/CTS) flow control
25         self._ser.rtscts = False
26
27         # disable hardware (DSR/DTR) flow control
28         self._ser.dsrtdtr = False
29
30         # timeout for write
31         self._ser.writeTimeout = 0
32
33         # print "Resetting LoRa Tranceiver..."
34         self.write_command('sys reset', False)
35         # print "Configuring Tranceiver..."
36         # Mac Configuration

```

```

37     self.write_command('mac set devaddr 001AD314')
38     self.write_command('mac set appskey 3
      C8F262739BFE3B7BC0826991AD0504D')
39     self.write_command('mac set nwkskey 2
      B7E151628AED2A6ABF7158809CF4F3C')
40     self.write_command('mac set adr off')
41     self.write_command('mac set sync 34')
42     self.write_command('mac set pwridx 10')
43     self.write_command('mac set dr 0')
44     self.write_command('mac save')
45
46     # Configure sub-bands
47     for ch in range(0, 63):
48         self.write_command('mac set ch status %d %s' % (ch, 'on'
          if ch in range(0, 7) else 'off'))
49
50     # join the network
51     # print "Attempting to Join Network..."
52     self.write_command('mac join abp')
53     response = self.read()
54     if response == 'accepted':
55         print "LoRa Tranceiver Configured. Joined (ABP)"
56     else:
57         print "ERROR: mac join returned unexpected response: ",
          response
58
59     def read(self):
60         '''
61         reads serial input
62         '''
63         return self._ser.readline().strip()
64
65     def write(self, str):
66         '''
67         writes out string to serial connection, returns response
68         '''
69         self._ser.write(str + '\r\n')
70         return self.read()
71
72     def write_command(self, config_str, check_resp=True):
73         '''
74         writes out a command
75         '''
76         # print "Command: '%s' "%config_str
77         response = self.write(config_str)
78         if check_resp and response != 'ok':
79             print "Command: '%s' " % config_str
80             print "Response: '%s' " % response
81
82     def send_message(self, data):
83         '''
84         sends a message to gateway

```

```

85         '''
86         # print "Sending message... "
87         # send packet (returns 'ok' immediately)
88         self.write_command('mac tx uncnf 5 ' + data)
89         # wait for success message
90         response = self.read()
91         if response == 'mac_tx_ok':
92             print "Message sent successfully!"
93         else:
94             print "ERROR: mac tx command returned unexpected
95                 response: ", response
96
97     def receive_message(self):
98         '''
99         waits for a message
100        '''
101        pass
102
103 if __name__ == "__main__":
104
105     port = '/dev/ttyACM0'
106     packets = 100
107     loramote = LoRaSerial(port)
108     data = "un"
109     print data.encode("hex")
110     for i in range(1, packets + 1):
111         loramote.send_message(data.encode("hex"))

```

Listing 3: Código del Transmisor

Apéndice B

Mediciones de RSSI y PER

Este apéndice se encuentra dividido en dos partes. En la primera C1, se presentan las gráficas resultantes del **RSSI** pertenecientes a cada uno de los radios, en la segunda parte, C2, se presentan los resultados del **PER** de las mediciones.

B.1. RSSI promedio en cada radio vs la distancia

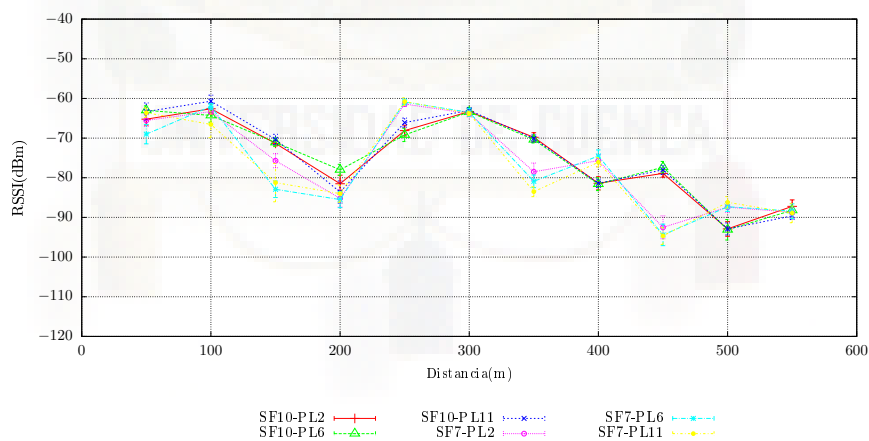


Figura B.1: RSSI radio 1

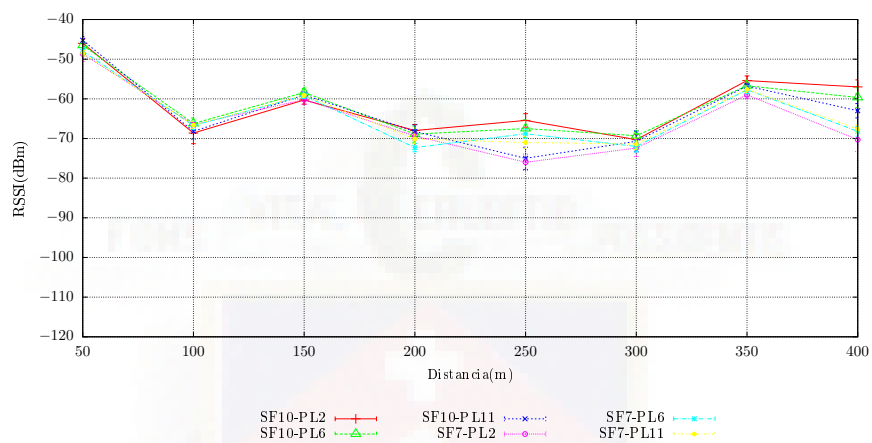


Figura B.2: RSSI radio 2

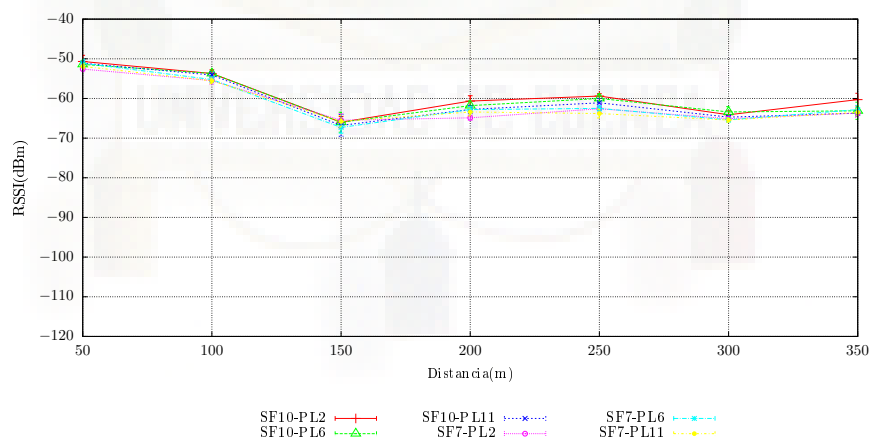


Figura B.3: RSSI radio 3

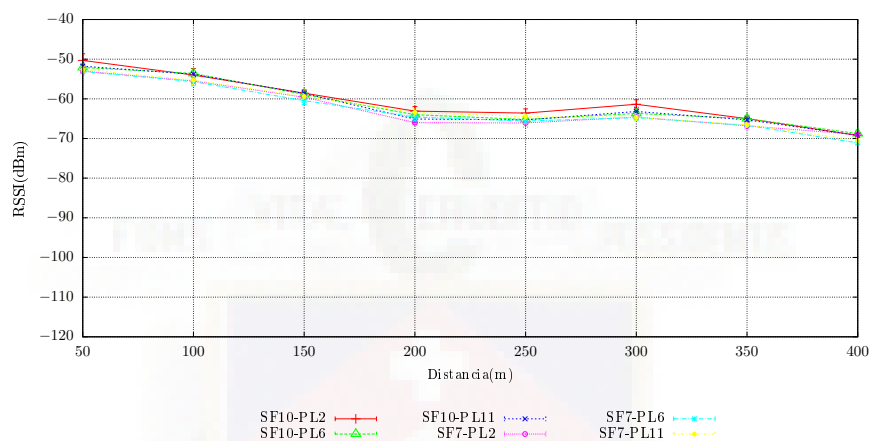


Figura B.4: RSSI radio 4

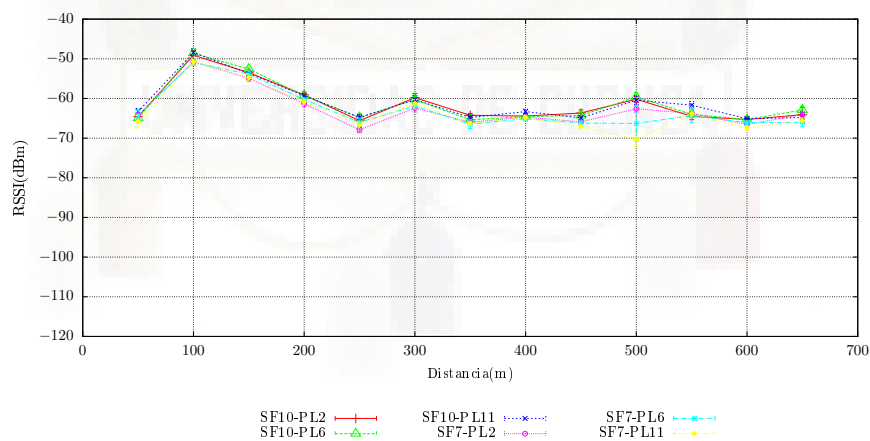


Figura B.5: RSSI radio 5

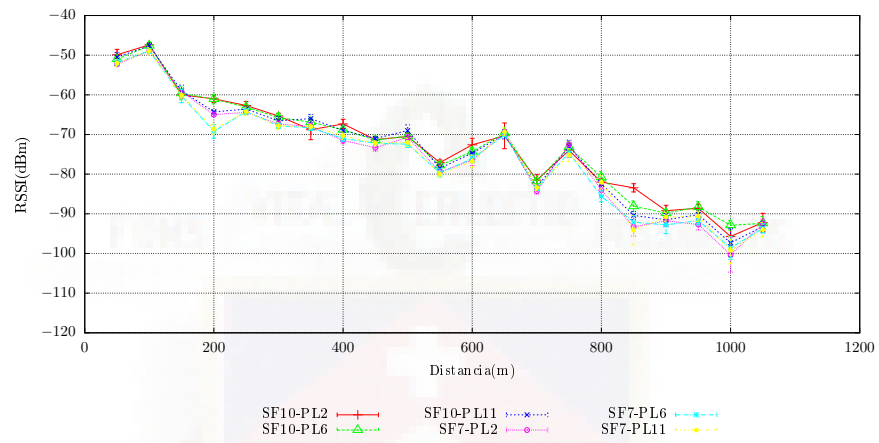


Figura B.6: RSSI radio 6

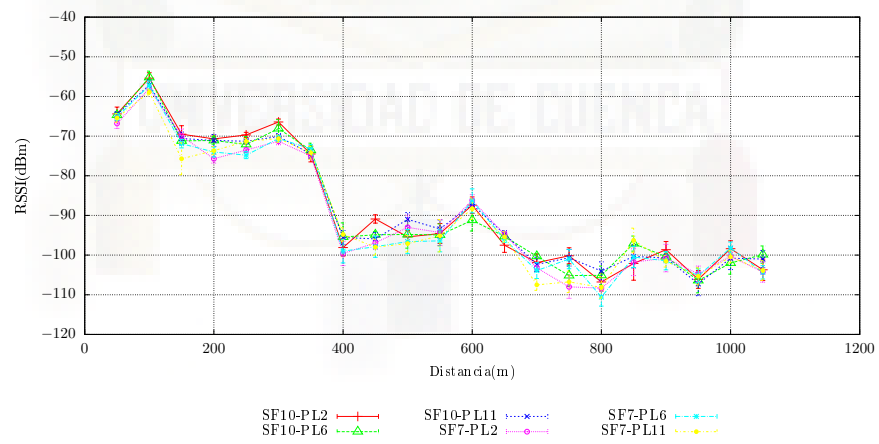


Figura B.7: RSSI radio 7

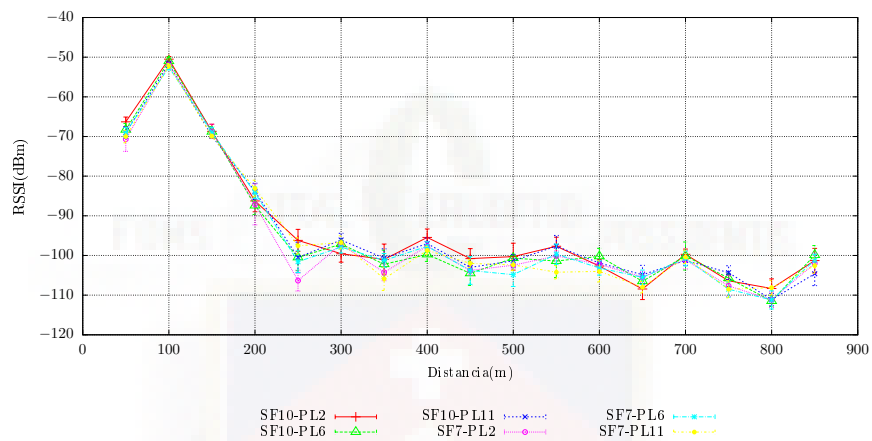


Figura B.8: RSSI radio 8

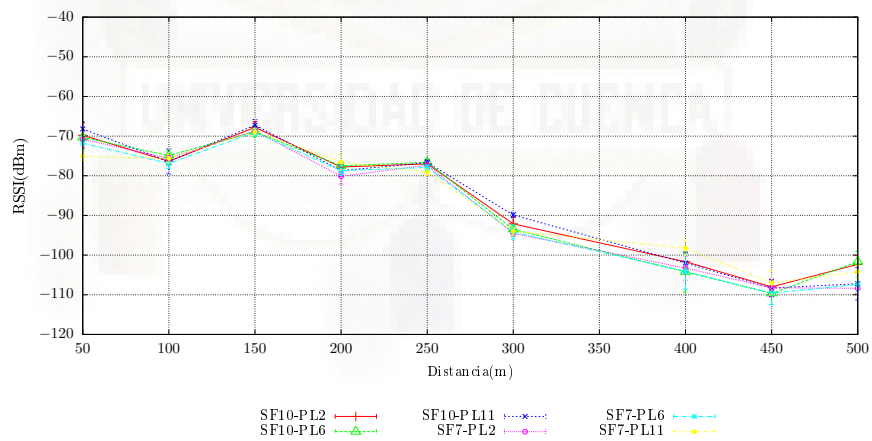


Figura B.9: RSSI radio 9

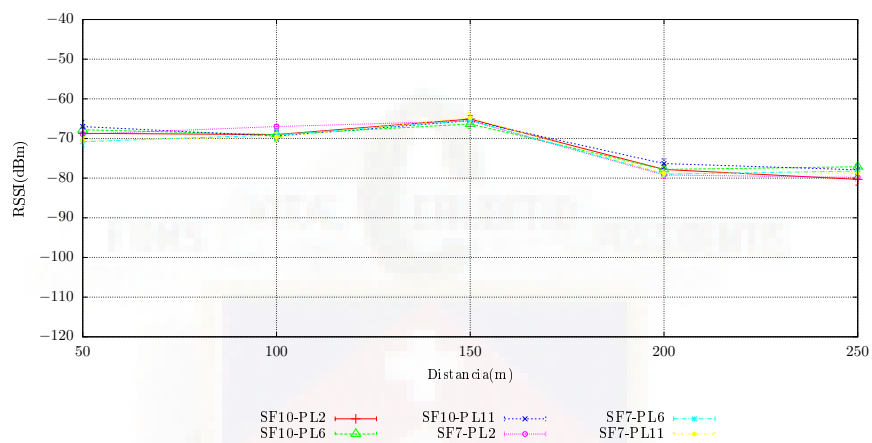


Figura B.10: RSSI radio 10

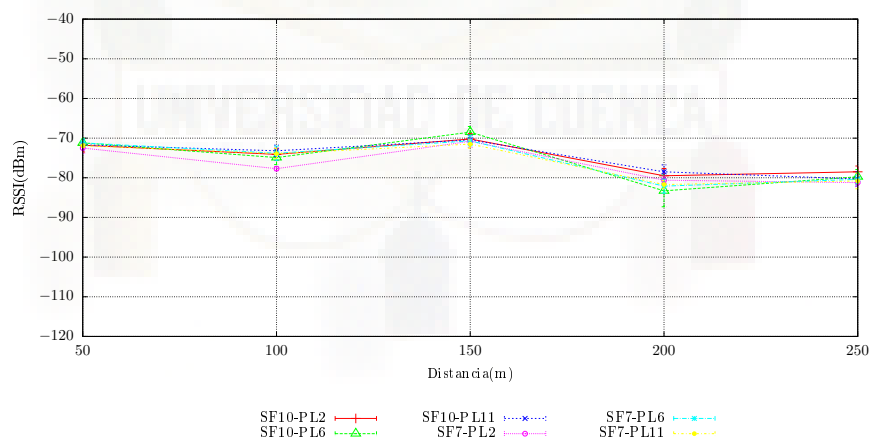


Figura B.11: RSSI radio 11

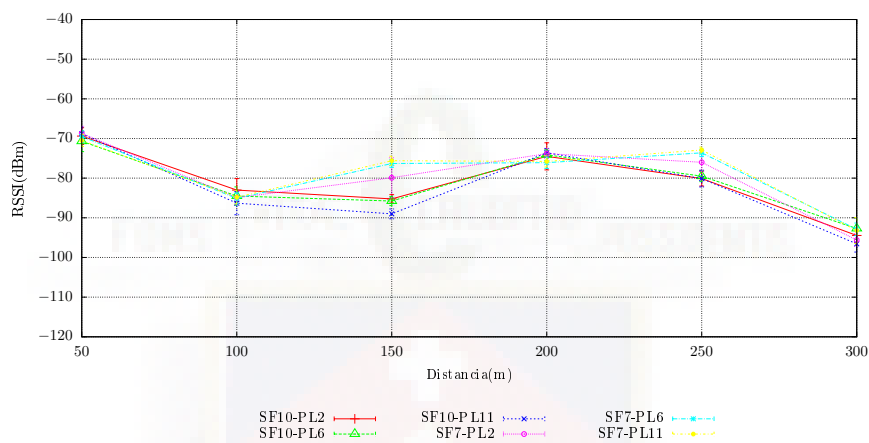


Figura B.12: RSSI radio 12

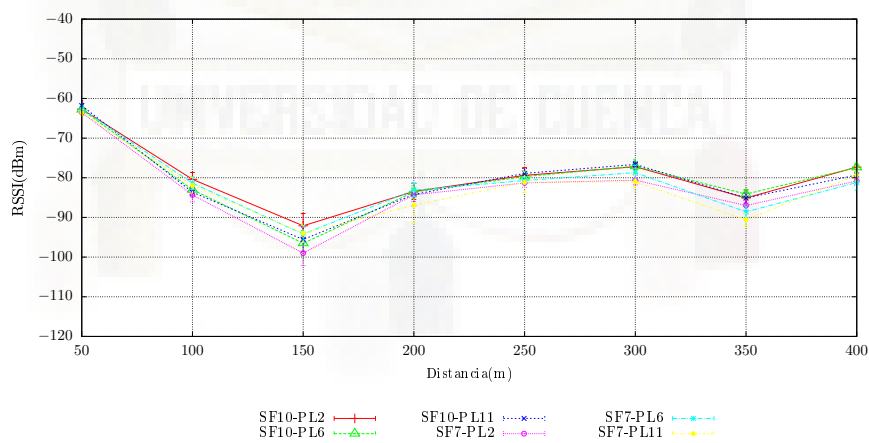


Figura B.13: RSSI radio 13

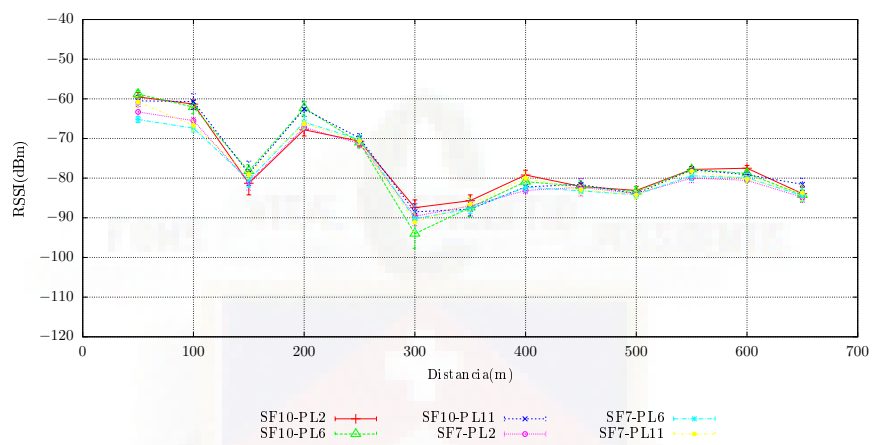


Figura B.14: RSSI radio 14

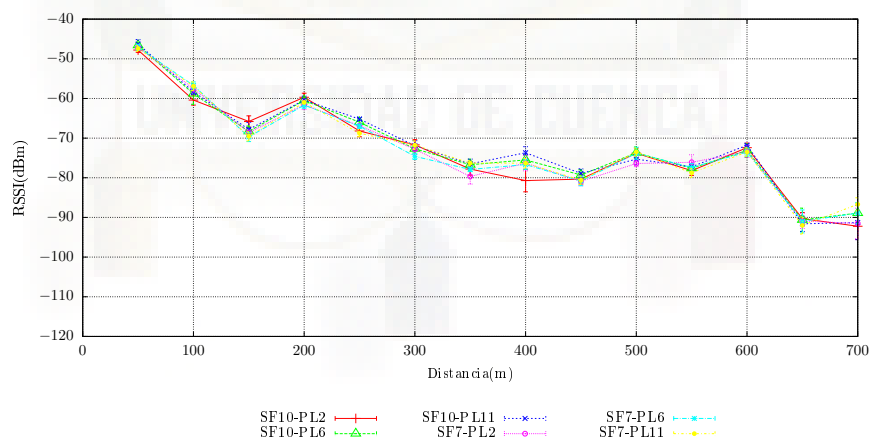


Figura B.15: RSSI radio 15

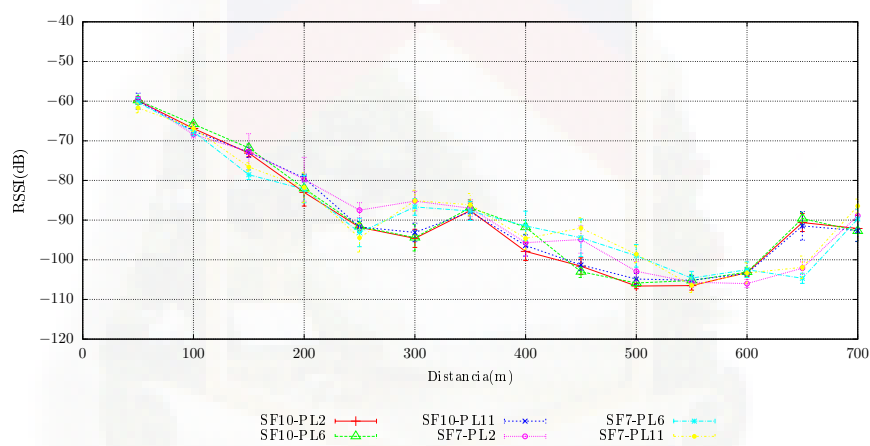


Figura B.16: RSSI radio 16

B.2. PER medido en cada radio vs la distancia

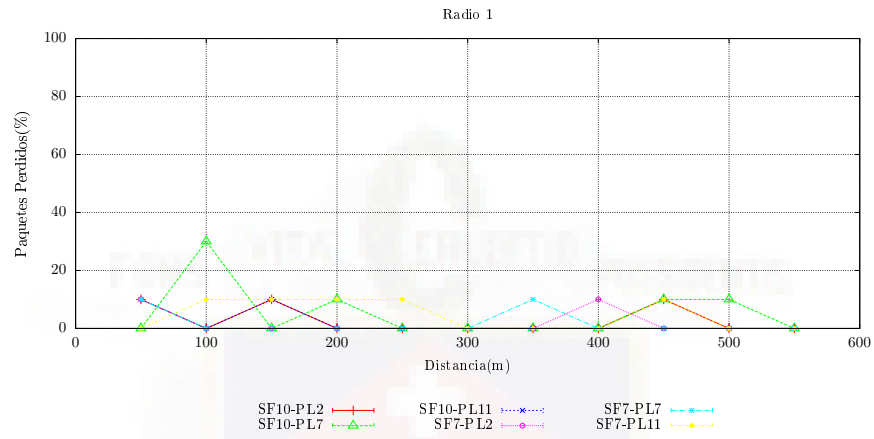


Figura B.17: PER radio 1

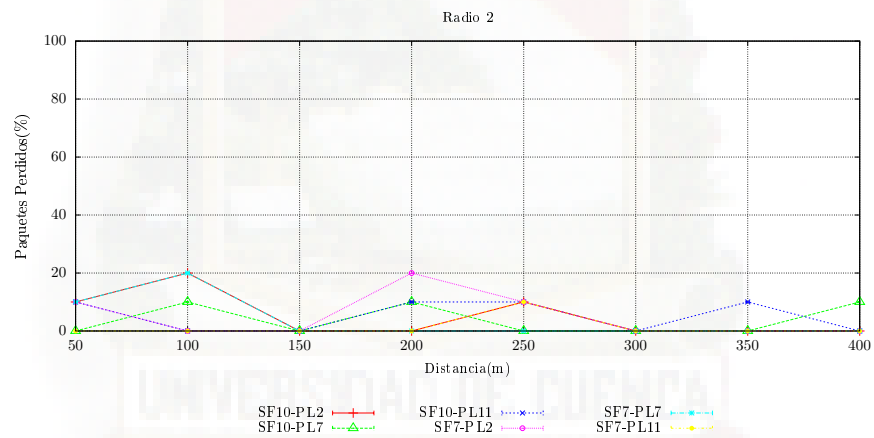


Figura B.18: PER radio 2

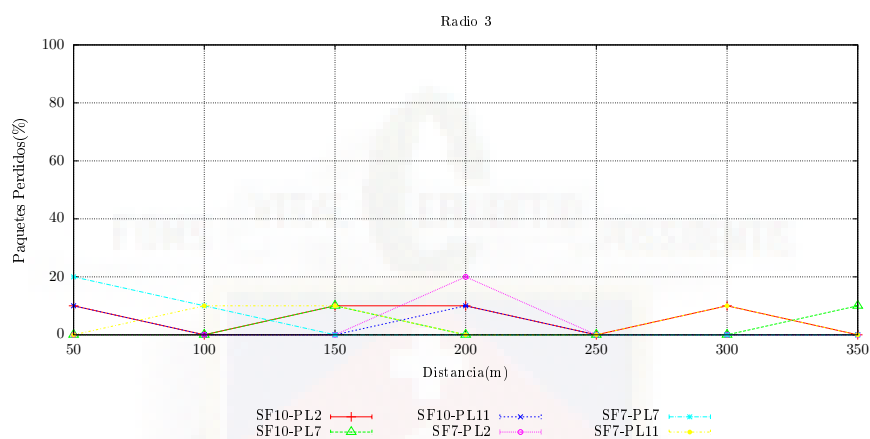


Figura B.19: PER radio 3

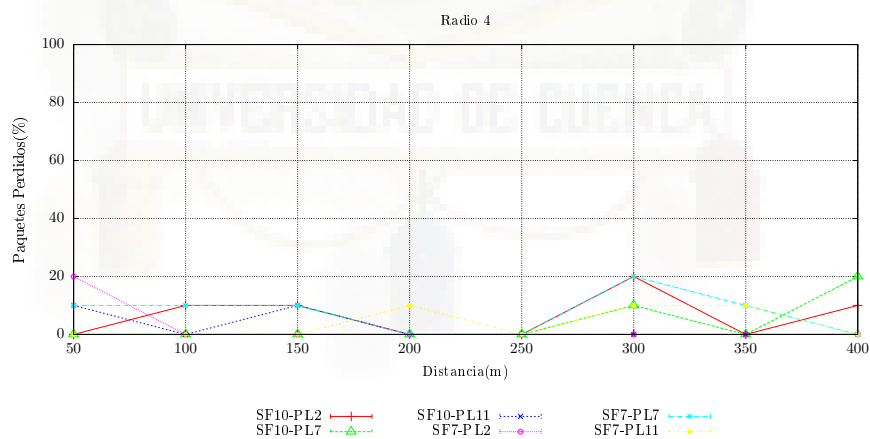


Figura B.20: PER radio 4

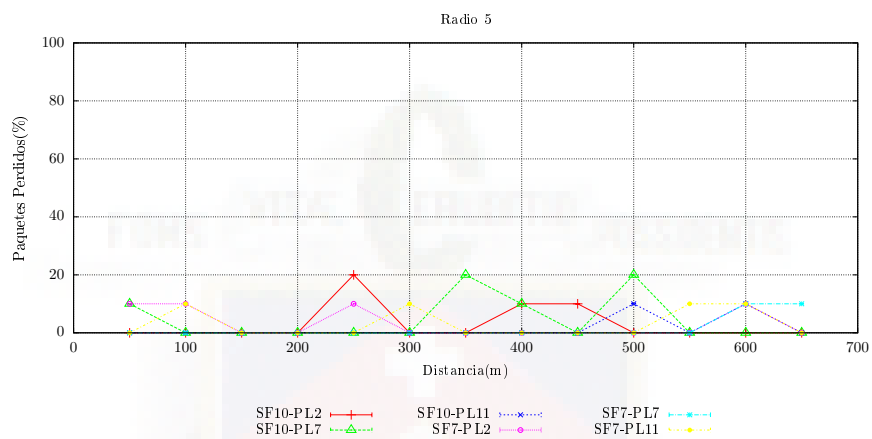


Figura B.21: PER radio 5

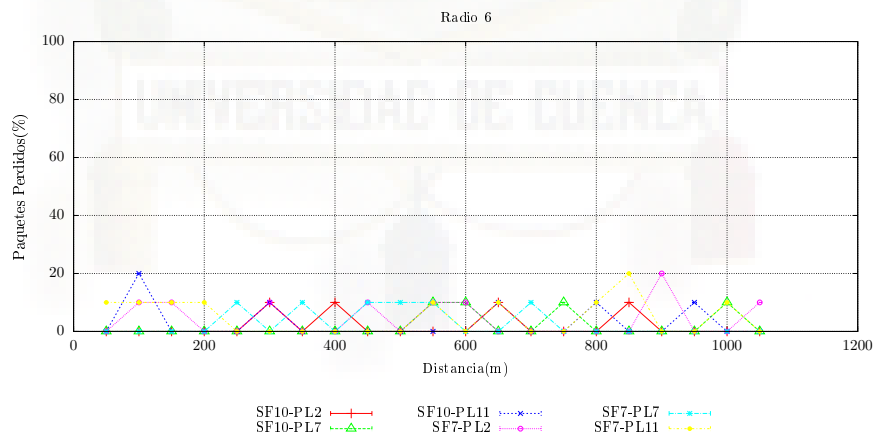


Figura B.22: PER radio 6

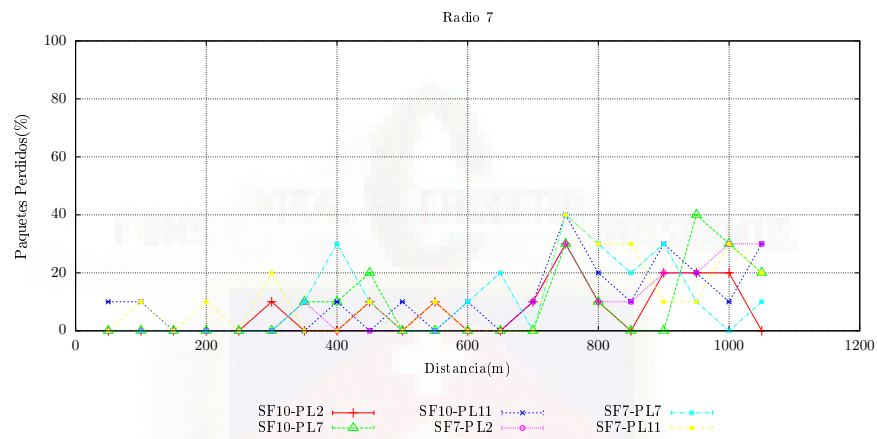


Figura B.23: PER radio 7

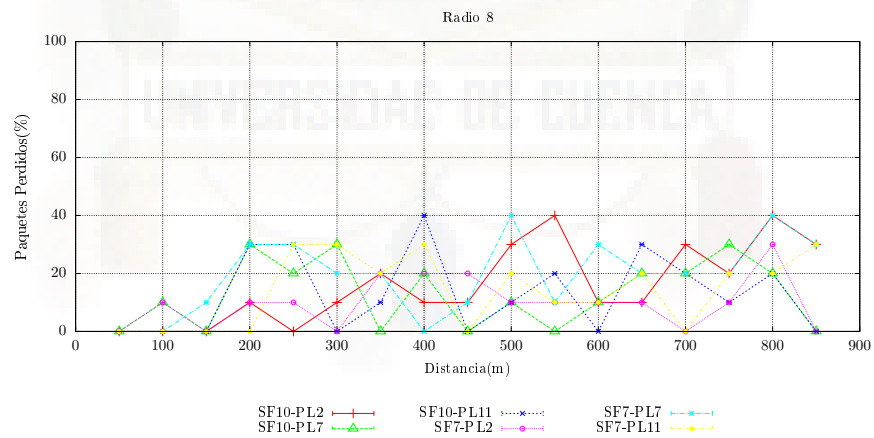


Figura B.24: PER radio 8

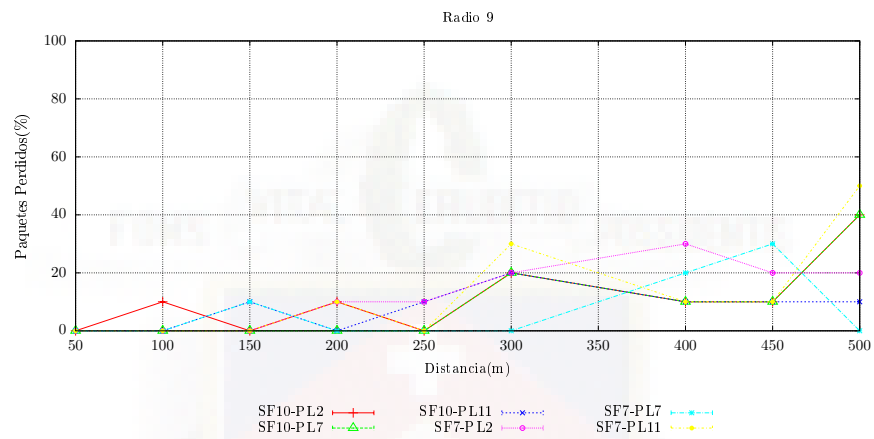


Figura B.25: PER radio 9

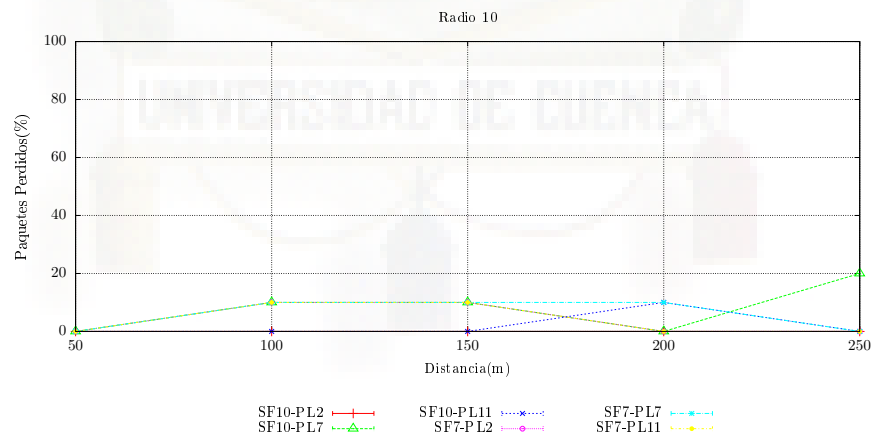


Figura B.26: PER radio 10

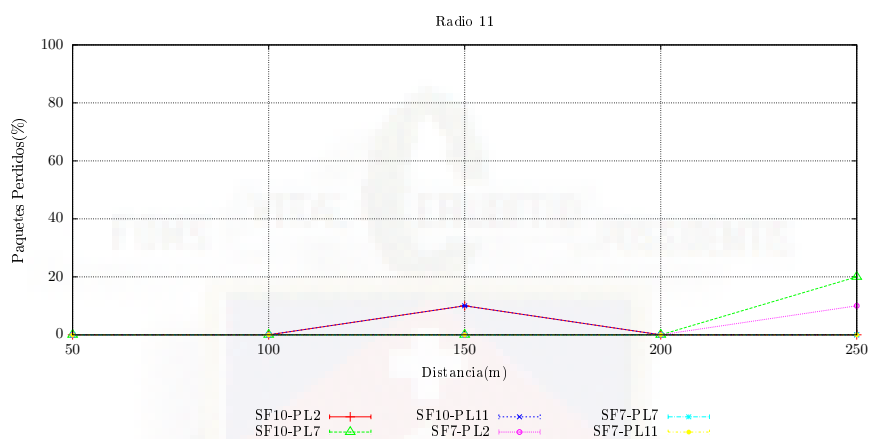


Figura B.27: PER radio 11

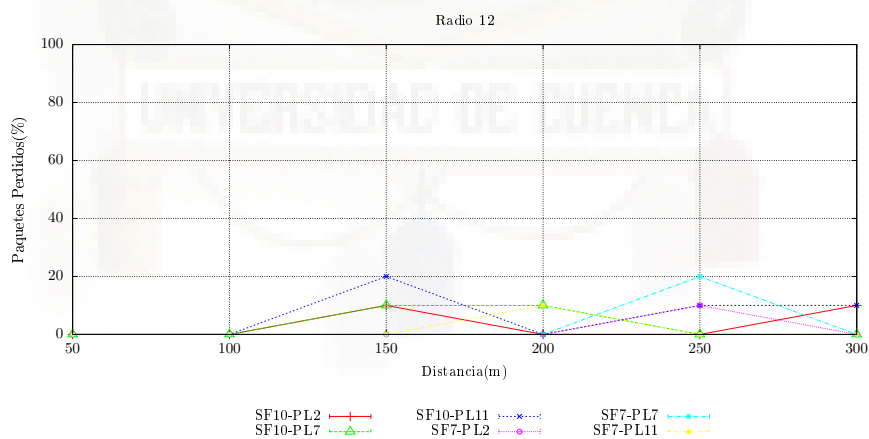


Figura B.28: PER radio 12

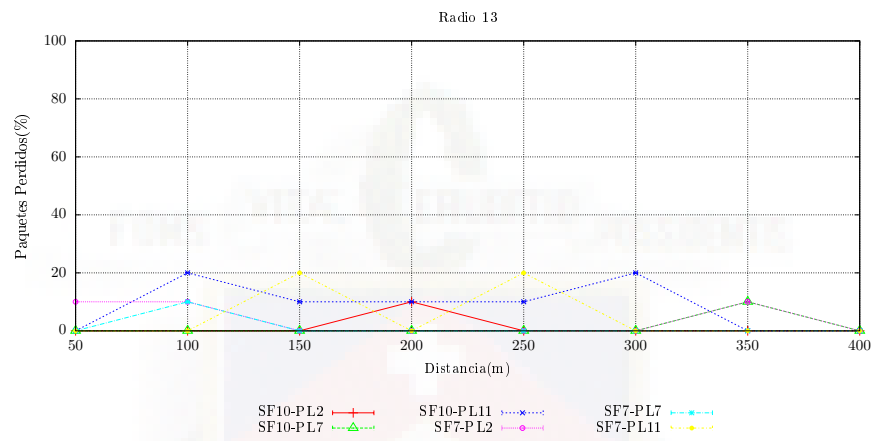


Figura B.29: PER radio 13

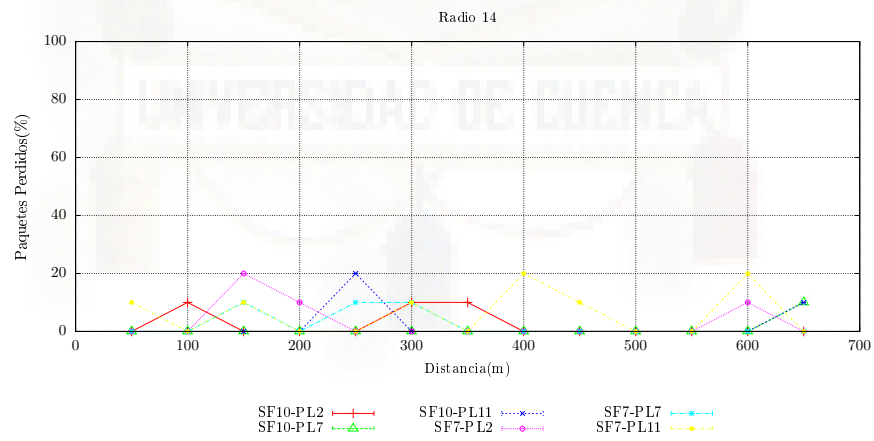


Figura B.30: PER radio 14

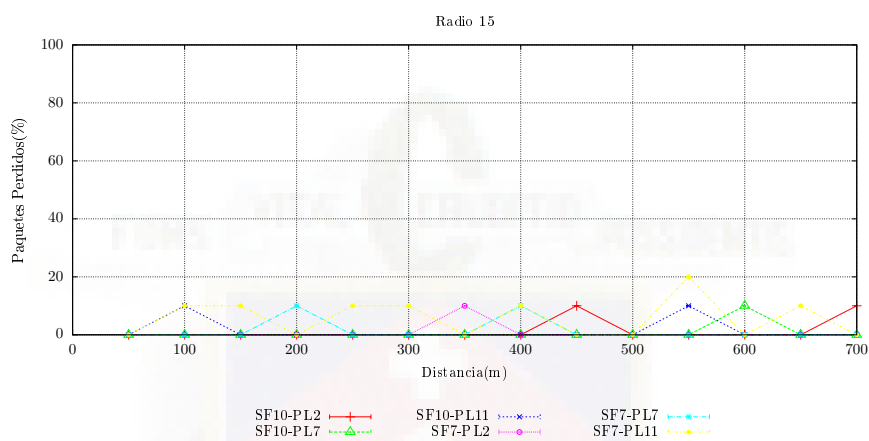


Figura B.31: PER radio 15

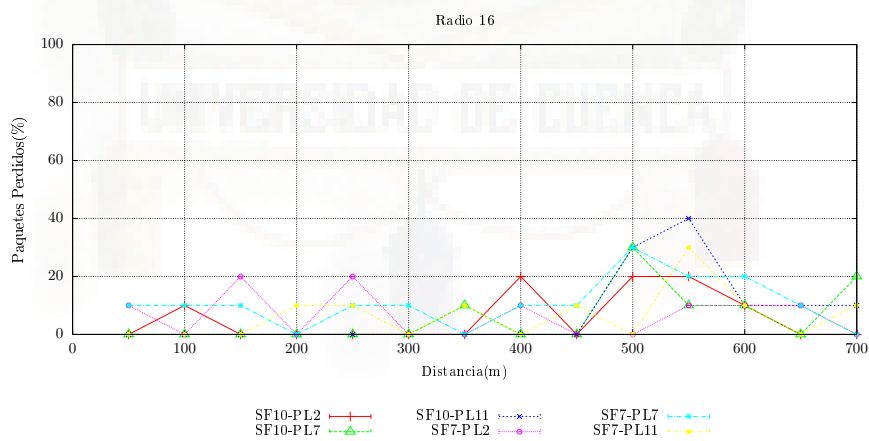


Figura B.32: PER radio 16



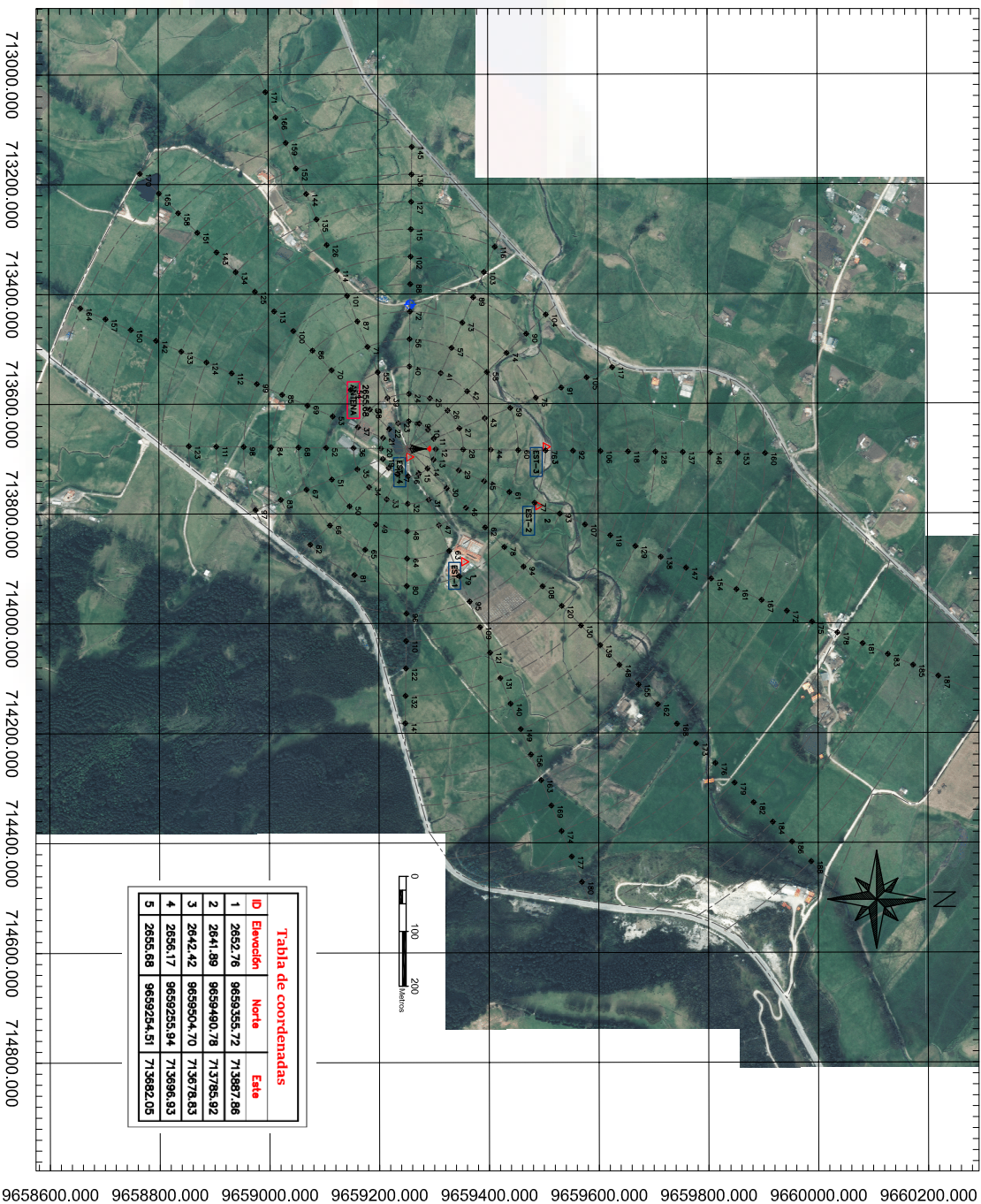
Apéndice C

Mapas

En este apéndice se muestra los mapas completos de las coordenadas de cada punto, un mapa de calor que tiene como parámetro el valor de RSSI y los perfiles topográficos de cada radio.

C.1. Coordenadas geográficas de todos los puntos de transmisión

Tabla de coordenadas			Tabla de coordenadas			Tabla de coordenadas		
ID	Este	Norte	ID	Este	Norte	ID	Este	Norte
8	9659255.17	713632.06	69	9659070.76	713603.10	130	9659566.52	714004.38
9	9659274.25	713636.11	70	9659114.55	713535.79	131	9659421.27	714100.01
10	9659290.33	713647.16	71	9659160.88	713466.29	132	9659349.66	714132.01
11	9659300.95	713656.82	72	9659207.78	713432.07	133	9659284.06	714142.02
12	9659304.51	713662.71	73	9659253.20	713462.35	134	9659460.51	713359.72
13	9659300.45	713701.79	74	9659333.59	713507.80	135	9659087.76	713634.09
14	9659229.40	713717.67	75	9659486.72	713569.41	136	9659102.05	713182.09
15	9659273.04	713728.48	76	9659504.49	713665.32	137	9659794.47	713668.99
16	9659234.88	713732.02	77	9659484.21	713700.73	138	965971.91	713879.42
17	9659293.76	713727.99	78	9659426.96	713681.12	139	9659303.41	713869.02
18	9659298.17	713716.94	79	9659434.16	713914.25	140	9659436.80	714146.45
19	9659208.07	713700.58	80	9659251.24	713935.05	141	9659247.97	714182.01
20	9659204.52	713681.40	81	9659155.63	713971.73	142	9659795.12	713644.68
21	9659298.57	713662.31	82	9659075.44	713965.50	143	9659005.62	713333.90
22	9659291.92	713646.24	83	9659022.31	713974.69	144	9659098.23	713271.65
23	9659253.99	713585.61	84	9659054.54	713678.78	145	9659281.71	713132.12
24	9659255.82	713582.06	85	9659024.82	713553.37	146	9659034.47	713689.25
25	9659292.89	713593.17	86	9659020.59	713582.02	147	9659075.85	713889.16
26	9659326.14	713612.27	87	9659167.87	713444.95	148	9659636.30	714076.01
27	9659394.73	713640.99	88	9659256.44	713532.08	149	9659345.33	714192.89
28	9659394.51	713683.96	89	9659372.93	713306.41	150	9658748.18	713464.95
29	9659416.38	713713.62	90	9659469.40	713472.71	151	9658897.73	713268.09
30	9659324.29	713705.98	91	9659333.16	713510.89	152	9659050.70	713711.21
31	9659291.57	713747.43	92	9659545.49	713655.98	153	9659054.46	713689.90
32	9659253.21	713702.04	93	9659530.51	713600.47	154	9659005.79	713711.63
33	9659253.04	713737.83	94	9659466.85	713590.44	155	9659067.19	713811.89
34	9659161.63	713719.11	95	9659365.68	713569.69	156	9659476.85	714239.33
35	9659154.52	713680.74	96	9659250.57	713332.02	157	9658703.24	713345.21
36	9659154.52	713680.74	97	9658975.59	713962.03	158	9659053.84	713625.87
37	9659162.63	713642.96	98	9658954.54	713678.13	159	9659032.17	713714.77
38	9659291.88	713610.42	99	9658978.88	713563.63	160	9659041.73	713680.55
39	9659294.48	713552.06	100	9659045.14	713647.16	161	9659106.08	714147.64
40	9659290.33	713545.23	101	9659143.34	713603.41	162	9659106.08	714147.64
41	9659291.57	713574.85	102	9659250.09	713332.02	163	9659495.38	714265.78
42	9659291.57	713574.85	103	9659392.67	713360.47	164	9659667.30	713425.47
43	9659393.83	713596.47	104	9659305.22	713437.82	165	9659800.95	713736.45
44	9659394.51	713606.40	105	9658979.60	713552.25	166	9659015.65	713073.33
45	9659392.33	713714.76	106	9658904.44	713566.63	167	9659097.67	713068.33
46	9659395.18	713739.59	107	9658975.09	713630.21	168	9659742.97	714163.46
47	9659391.47	713782.13	108	9659498.74	713922.75	169	9659561.91	714322.22
48	9659252.55	713832.04	109	9659384.21	714002.02	170	9659785.06	713810.64
49	9659291.50	713811.87	110	9659249.94	714032.12	171	9658996.12	713031.89
50	96593147.07	713786.72	111	9658804.54	713677.47	172	9659943.61	713978.10
51	9659315.19	713737.64	112	9658632.94	713431.89	173	9659717.86	714216.27
52	9659315.19	713737.64	113	9659010.29	713431.89	174	9659532.44	714078.66
53	9659316.89	713822.84	114	9659124.82	713356.97	175	9659080.55	713907.84
54	9659149.84	713547.65	115	9659255.75	713262.09	176	9659581.97	714025.09
55	9659198.93	713542.73	116	9659421.41	713471.43	177	9659509.77	714425.10
56	9659257.13	71482.07	117	9658626.04	713533.82	178	9658603.49	714017.58
57	9659393.46	713468.29	118	9659505.48	713630.25	179	9659394.64	714230.90
58	9659397.77	713542.49	119	9658982.03	713830.95	180	9659586.49	714471.54
59	9659440.28	713607.94	120	9658533.63	713968.57	181	96580081.43	714037.31
60	9659594.50	713968.07	121	9659402.74	714063.57	182	96589882.53	714326.72
61	9659494.27	713761.00	122	9658948.28	714082.02	183	96589127.37	714057.05
62	9659394.37	713952.31	123	9658654.55	713676.82	184	9659817.42	714362.55
63	9659392.63	713967.81	124	9658887.00	713524.16	185	966077.31	714078.79
64	9659251.90	713881.03	125	9658870.75	713355.45	186	9659925.31	714078.79
65	9659175.57	713965.81	126	9659106.29	713310.53	187	96586218.25	714036.32
66	9659911.25	713921.61	127	9659260.40	713232.09	188	9659097.20	714454.16
67	9659094.53	713756.16	128	9658704.48	713657.94			
68	9659504.53	713679.13	129	9658967.97	713859.88			



<p>SIMBOLOGIA</p> <ul style="list-style-type: none"> ANTENA ESTACION DE CONTROL PUNTO DE RESECCION PUNTO DE REFERENCIA 					
		<i>Fecha:</i>		<i>Nombre</i>	
		20-05-18		Carlos Alvarez	
		<i>Comprobado</i>		Carlos Alvarez	
		<i>Coordenadas</i>		UTM WGS84 17S	
<i>Escala:</i>		1/8600		UNIVERSIDAD DE CUENCA carlos.alvarez@qucuenca.ec	
MAPA GEOGRAFICO DE PUNTOS DE CONTROL					
Lamina n.					
1/1					
N. Alumno:					
Curso:					



C.2. Mapa de calor del RSSI en toda la granja



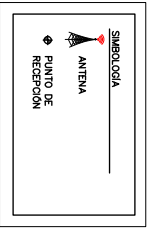
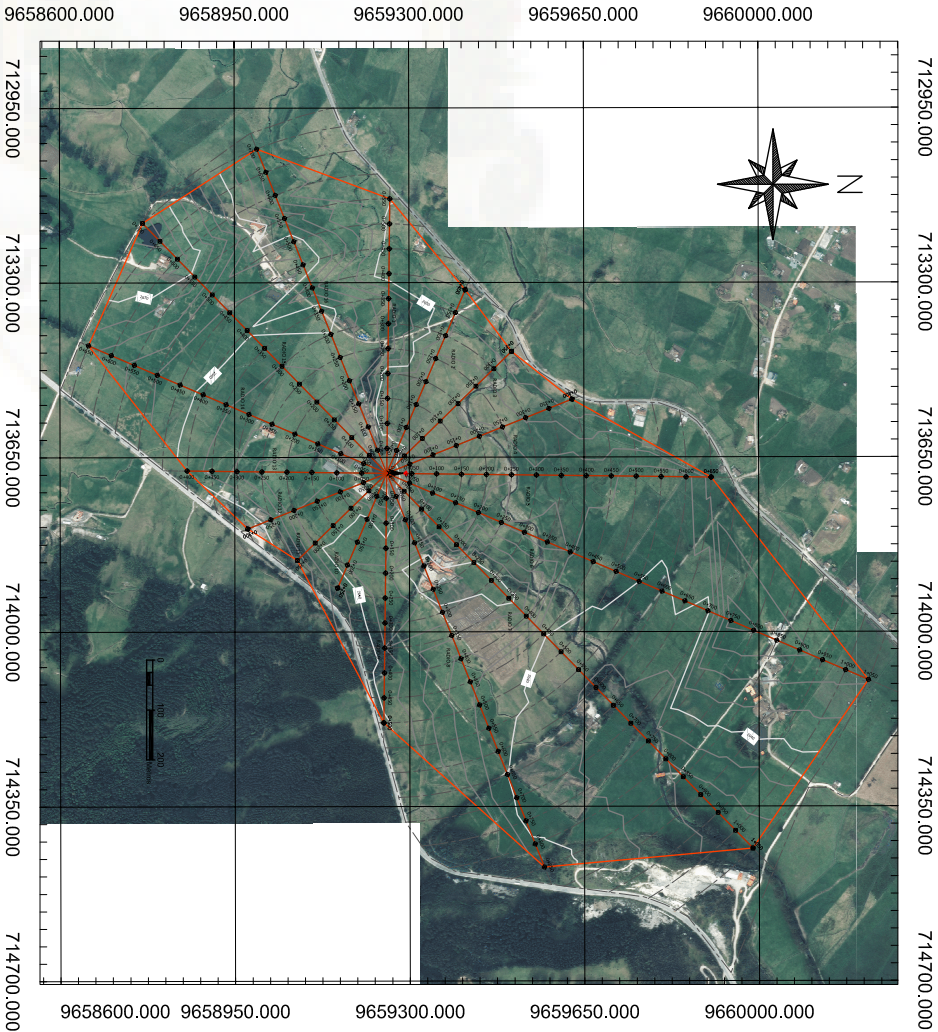
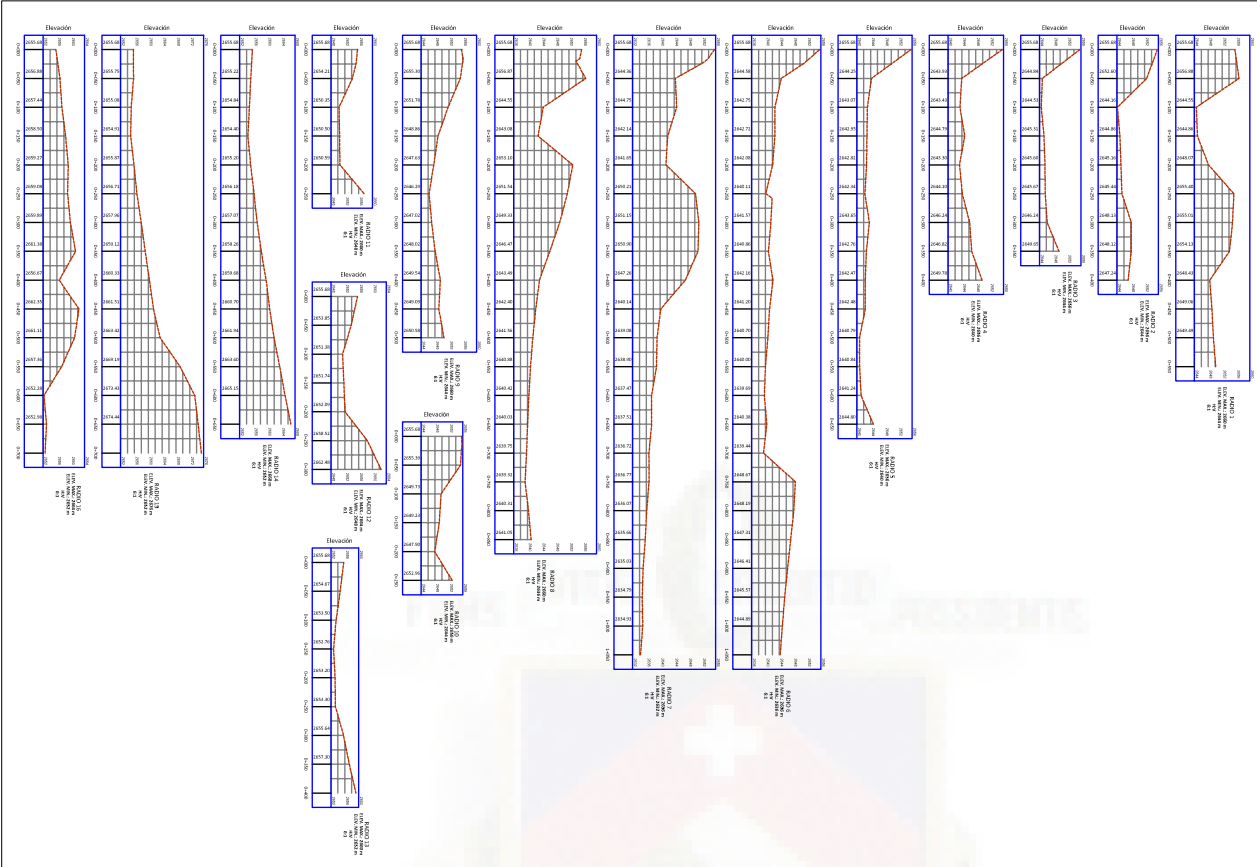



C.3. Perfiles topográficos de cada radio



Mapa geográfico de Irquis con levantamiento planimétrico con perfiles

La superficie de la zona estudiada es de 1000 metros cuadrados. La zona de estudio corresponde a un levantamiento por medio de estaciones de puntos de apoyo y de puntos de apoyo de 20 a 30 metros. Los datos obtenidos se encuentran en el archivo adjunto. El levantamiento se realizó en la zona de estudio.



			
FINES: VITA, CIENTIA, RESERVITAS			
Fecha:	Nombre:	Firma:	
Dibujado:	22-07-18	Carlos Alvarez	UNIVERSIDAD DE CUENCA
Comprobado:	30-07-18	Carlos Alvarez	
Coordenadas:	—	UTM WGS84 17S	carlos.alvarez@ucuenca.ec
Escala:	1/10700	Lámina n.	
MAPA GEOGRÁFICO DE PUNTOS DE CONTROL		2/2	
		N. Alumno:	
		Curso:	

Bibliografía

- [1] T. Yuden, “Taiyo Yuden’s IoT (Internet of Things) sensor nodes to data display.” [En línea]. Disponible: <https://www.yuden.co.jp/ut/solutions/iot/>
- [2] E. Pietroseoli, “Wireless standards for IoT: WiFi, BLE SigFox NB-IoT and LoRa,” *International Centre for Theoretical Physics*, 2016.
- [3] Semtech, “LoRa Modulation Basics,” pp. 1–26, 2015.
- [4] M. A. y A. Sikora, “Free space range measurment with Semtech LoRa tecnologia,” *2nd International Symposium on Wireless System within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems*, 2014.
- [5] W. Z. S. L., J. H., “Design and Implementation of Smart Irrigation System Based on LoRa,” *IEEE Globecom Workshop*, 2017.
- [6] D. Y. S. K. A. S. A. Riegsecker, “An Experimental LoRa Performance Evaluation in Tree Farm ,” *IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 2018.
- [7] E. 14, “Raspberry Pi 3 Model B.” [En línea]. Disponible: https://www.terraelectronica.ru/pdf/show?pdf_file=%252Fds%252Fpdf%252FT%252FTechicRP3.pdf
- [8] Intempresas, “Microchip presenta los primeros kits de evaluación de tecnología Lora.” [En línea]. Disponible: <http://www.interempresas.net/Electronica/Articulos/156961-Microchip-presenta-primeros-kits-evaluacion-tecnologia-Lora-redes-area-amplia-bajo.html>
- [9] M. Electronics, “Microchip Technology Microchip RN2903 LoRa Technology Mote.” [En línea]. Disponible: <https://www.mouser.mx/new/microchip/microchip-rn2903-lora-mote/>
- [10] C. E. O. O. O. a. I. K. Tajudeen O. Olasupo, “Empirical Path Loss Models for Wireless Sensor Network Deployments in Short and Tall Natural Grass Environments,” *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, 2016.



- [11] L. Alliance, “LoRaWAN Regional Parameters,” 2017. [En línea]. Disponible: https://loro-alliance.org/sites/default/files/2018-05/lorawan_regional_parameters_v1.0.2_final_1944_1.pdf
- [12] L. A. T. C. R. P. Workgroup, “LoRaWAN 1.1 Regional Parameters,” 2018. [En línea]. Disponible: https://loro-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_regional_parameters_v1.1rb_-_final.pdf
- [13] S. T. Somayya Madakam, R. Ramaswamy, “Internet of Things (IoT): A Literature Review,” *IEEE Journal of Computer and Communications*, num. 3, pp. 164–173, 2015.
- [14] *Overview of the Internet of things Y-2060*, 1ra ed., Sector de normalización de las telecomunicaciones de la ITU, Junio 2012.
- [15] D. C. Alejandro Cama, Emiro de la Oz, “Las redes de sensores inalámbricas y el internet de las cosas,” *Revista INGE CUC*, vol. 8, 2012.
- [16] D. B. y. E. P. Magno, D. Boyle, “Ensuring Survivability of Resource-Intensive Sensor Networks Through UltraLow Power Overlays,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, num. 2, pp. 946–956, 2014.
- [17] N. M. D. y. Y. E. J. H. Zainol Abidin, “Multi-objective Optimization (MOO) approach for sensor node placement in WSN,” *7th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*, 2014.
- [18] M. Y. Yatish K. Joshi, “Restoring Connectivity in a Resource Constrained WSN,” *Journal of Network and Computer Applications*, 2016.
- [19] T. M. W. 1.0, “A technical overview of LoRa and LoRaWAN,” LoRa Alliance, Tech. Rep., 2016.
- [20] *SX1272/73 - 860 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver*, Semtech Corporation, Marzo 2017.
- [21] W. M. Brecht Reynders y S. Pollin, “Range and Coexistence Analysis of Long Range Unlicensed Communication,” *23rd International Conference on Telecommunications (ICT)*, 2016.
- [22] L. A. TM, “The LoRaWAN™ Specifications,” 2019. [En línea]. Disponible: <https://loro-alliance.org/about-lorawan>
- [23] Y. B. Syeda Amtul Mateen, “A forest fire monitoring system based on GPS and Zigbee Wireless Sensor Network,” *International Journal of Eminent Engineering Technologies*, vol. 4, 2016.



- [24] P. M. A. Palaaios, "Propagation models for users crossing forest areas in central European forest environments," *Military Communications Conference*, 2016.
- [25] M. W. W. D. P. Smith, "Boreal Forest Low Antenna Height Propagation Measurements," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, num. 9, pp. 4004–4011, 2016.
- [26] *LoRa Technology Evaluation Suite User's Guide*, Microchip Technology Inc., 2016.
- [27] I. W. M. H. T. Nastiti, I. E. Praditya, "Evaluation of XBee-Pro transmission range for Wireless Sensor Network's node under forested environments based on Received Signal Strength Indicator (RSSI)," *2nd International Conference on Science and Technology-Computer (ICST)*, pp. 56–60, 2016.
- [28] U. de Cuenca, "Granjas," 2014. [En línea]. Disponible: <https://www.ucuenca.edu.ec/la-oferta-academica/oferta-de-grado/facultad-de-ciencias-agropecuarias/granjasirquis>
- [29] A. C. P. Esteban, "Evaluación del rango de transmisión de LoRa para redes de sensores inalámbricas con LoRaWAN en ambientes forestales," 2017. [En línea]. Disponible: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/28504>
- [30] M. T. Lazarescu, "Design of a WSN platform for long-term environmental monitoring form IoT applications," *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, vol. 3, num. 1, pp. 45–54, 2015.
- [31] A. Z. y. M. Z. L. Vangelista, "Long-range IoT technologies: The dawn of Lo-Ra," *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering*, vol. 159, pp. 51–58, 2015.
- [32] . Y. T. C. y. W. T. A. Augustin, "A Study of LoRa: Long Range and Low Power Networks for the Internet of Things," *Sensors 2016*, vol. 16, p. 1466, 2016.
- [33] A. Daboin, "Medición de rssi y pruebas de cobertura para diferentes escenarios de propagación en una red inalámbrica de sensores," *REDIP-Revista Digital de Investigación y Postgrado*, vol. 2, 1 2012.
- [34] A. Noren, "dB, dBm y RSSI," 2018. [En línea]. Disponible: <http://maneldeantonio.com/dbs-dbm-rssi>
- [35] Ian F. Akyildiz, Mehmet Can Vuran, *Wireless Sensor Network*. John Wiley and Sons, 2010, num. October.
- [36] B. P. Camila Maldonado, "Diseño de una red inalámbrica para la gestión y control de un sistema integral de sistemas de riego," *trabajo de fin de grado*, Universidad Distrital Francisco José De Caldas 2017.



- [37] M. H. H. Rahman, "A comparison of 802.11ah and 802.15.4 for IoT," *The Corean Institute of Communications and Information Sciences*, pp. 100–102, 2016.
- [38] A. L. A. K. y. A. G. E. Khorov, "An enabling networking technology for smart cities," *A survey on IEEE 802.11 ah*, vol. 58, pp. 53–69, 2015. [En línea]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366414002989>
- [39] M. M. R. V. G. F. C. Buratti, *Sensor Networks with IEEE 802.15.4 Systems: Distributed Processing, MAC, and Connectivity*. Springer, 2011.
- [40] L. S. Committee, "IEEE Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)," 2016.
- [41] L. V. A. Z. y. M. Z. M. Centenaro, "Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios," *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, num. 5, pp. 60–67, 2016.
- [42] G. I. F. Tool, "global internet of things market to grow to 27 billion devices, generating usd3 trillion revenue in 2025," 2016.
- [43] I. TM, "El imparable auge de las redes LPWAN amenaza a las redes móviles tradicionales," 2016. [En línea]. Disponible: <https://www.interxion.com/es/blogs/2016/07/el-imparable-auge-de-las-redes-lpwan-amenaza-a-las-redes-moviles-tradicionales/>
- [44] T. M. y. O. S. J. Bardyn, "IoT: The era of LPWAN is starting now," *European Solid-State*, 2016.
- [45] O. Khutsoane, A. Abu-Mahfouz, y B. Isong, "Iot devices and applications based on lora/-lorawan," 11 2017.
- [46] K. M. Marko Pettissalo, "Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology: Doppler robustness, scalability, and coverage," *Technological Advances in Wireless Sensor Networks Enabling Diverse IoT Applications*, 2017.
- [47] Semtechv, "LoRa Modulation Basics," *Wireless, Sensing and Timing Products*, 2015.
- [48] B. S. y Matthew Knight, "Decoding LoRa: Realizing a Modern LPWAN with SDR," *Proceedings of the 6th GNU Radio Conference*, 2016.
- [49] I. O. Monfort, "Estudio de la Arquitectura y el nivel de desarrollo de la red LoRaWAN y de los dispositivos LoRa." [En línea]. Disponible: <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/64365/6/iordonezTFM0617memC3B2ria.pdf>
- [50] C. Y. B. Ordóñez, "Implementación de una red de sensores inalámbricos LPWAN mediante módulos LoRa para el monitoreo de la calidad del agua en 2 ríos," *Trabajo Final de grado*, Universidad Distrital Francisco José De Caldas 2017.



- [51] N. Pierce, "Aspects of precision agriculture," *Advances in Agronomy*, vol. 67, 1999.
- [52] C. M. Evandro Chartuni, *Manual de agricultura de precisión*. Imprenta Boscana, 2014.
- [53] S. Ravindra, "Iot applications in agriculture," 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.iotforall.com/iot-applications-in-agriculture/>
- [54] J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, M. Hamalainen, y J. Iinatti, "Evaluation of LoRa LPWAN technology for remote health and wellbeing monitoring," pp. 1–5, 2016. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7498898/>
- [55] Iswandi, H. T. Nastiti, I. E. Praditya, y I. W. Mustika, "Evaluation of XBee-Pro transmission range for Wireless Sensor Network's node under forested environments based on Received Signal Strength Indicator (RSSI)," in *2016 2nd International Conference on Science and Technology-Computer (ICST)*. IEEE, 2016, pp. 56–60. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7877347/>
- [56] T. Rama Rao, D. Balachander, A. Nanda Kiran, y S. Oscar, "RF propagation measurements in forest & plantation environments for Wireless Sensor Networks," *International Conference on Recent Trends in Information Technology, ICRTIT 2012*, pp. 308–313, 2012.
- [57] A. Konstantin Mikhaylov, "On the coverage of LPWANs: Range Evaluation and Channel Attenuation Model," *Proceedings of the 2016 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*, 2016.
- [58] M. A. Ertürk, "Lorawan indoor performance analysis," *International Research Journal of Computer Science*, vol. 10, 10 2017.
- [59] J. P. y. K. Mikhaylov, "Evaluation of LoRa LPWAN technology for remote health and wellbeing monitoring," *ISMICT*, 2016.
- [60] D. H. K. Jun Young Lim, "Low-Power Long-Range, High-Data Transmission Using Wi-Fi and LoRa," *6th International Conference on IT Convergence and Security (ICITCS)*, 2016. [En línea]. Disponible: <https://sci-hub.tw/10.1109/icitcs.2016.7740351>
- [61] R. pi Fundation, "Raspberry Pi." [En línea]. Disponible: <https://www.raspberrypi.org/help/what-is-a-raspberry-pi/>
- [62] Climate-Data.org, "Clima Ecuador." [En línea]. Disponible: <https://es.climate-data.org/country/63/>
- [63] J. C. Daeun Yim, "An Experimental LoRa Performance Evaluation in Tree Farm," *IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 2018.
- [64] L. K. Wang Huizan, Zhang Ren, "Improved Kriging Interpolation Based on Support Vector Machine and Its Application in Oceanic Missing Data Recovery ," *International Conference on Computer Science and Software Engineering*, 2008.



- [65] Shah, Mohak, Japkowicz, *Evaluating Learning Algorithms: A Classification Perspective*. Cambridge University Press, 2014.
- [66] R. G. B. y J. y. J. M. J. González Such, “SPSS: Pruebas no Paramétricas,” *Universitat de Valencia*, 2010.
- [67] B. Z. A. S. B., “Basic statistical tools in research and data analysis,” *Indian Journal of Anaesthesia*, vol. 60, num. 9, pp. 662–669, 2016.
- [68] F. T. Romero, “Información del conocimiento organizacional a través de los informes anuales publicados en las páginas web de las empresas,” *Revista Española de Documentación Científica*, 2013.

